

PROPIEDADES RESILIENTES DE SUBRASANTES GRANULARES
ESTABILIZADAS CON CENIZA VOLANTE PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES

ALEX STEWARD CAMELO ROJAS
HECTOR LEONARDO GONZÁLEZ ESPOSITO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ, D. C.

2021

PROPIEDADES RESILIENTES DE SUBRASANTES GRANULARES
ESTABILIZADAS CON CENIZA VOLANTE PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS
FLEXIBLES

ALEX STEWARD CAMELO ROJAS
HECTOR LEONARDO GONZÁLEZ ESPOSITO

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero civil

Directora
LAURA MANRIQUE SÁNCHEZ
Ingeniera civil

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ, D. C.
2021



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia.](#)

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 24, junio, 2021

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que fueron partícipes durante mi formación académica, principalmente:

A Dios, por permitirme culminar esta etapa de mi vida profesional.

A la Universidad Católica de Colombia, por brindarnos espacios para el aprendizaje y docentes con excelentes aptitudes profesionales.

A mi madre Nilse Rojas Villamil, por su apoyo incondicional durante toda mi vida universitaria.

A mis hermanos Arley y Laura Camelo, por su gran ayuda en todo momento durante la realización de este trabajo de grado.

A Lina María Güiza Riaño, por su comprensión, motivación y apoyo en mi formación como estudiante para optar al título de Ingeniero civil.

Dedico especialmente la realización de este trabajo a mi tío Pedro A. Rojas por su apoyo incondicional y a mi nonita Blanca Villamil, por ser mi motivación y ejemplo a seguir.

Alex Steward Camelo Rojas

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que estuvieron presentes en mi formación como profesional principalmente:

A Dios por permitirme darme salud y las fuerzas necesarias para continuar con mi proyecto de vida de la mano con mi familia.

A mi madre, Rosa Elena Esposito Hernández por brindarme su apoyo incondicional durante toda la formación como persona y profesional.

A mi tía, Blanca Lilia Esposito Hernández por su apoyo incondicional en todo momento en mi formación como persona y profesional.

A mis hermanos Luisa, Camilo y Sebastián González por su colaboración, entendimiento durante el desarrollo de mi carrera.

Héctor Leonardo González Esposito

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. GENERAL	3
2.2. ESPECÍFICOS	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
4. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	6
4.1. ANTECEDENTES	6
4.2. JUSTIFICACIÓN	11
5. ALCANCES Y LIMITACIONES	12
5.1. ALCANCES	12
5.2. LIMITACIONES	12
6. MARCO TEÓRICO	13
6.1. CENIZAS VOLANTES	13
6.1.1. Origen.....	13
6.1.2. Tipos.....	14
6.1.3. Caracterización.....	16
6.1.4. Aplicación.	18
6.1.4.1. Aplicaciones integrales.	18
6.1.4.1. Efectos.....	20
6.2. DEFORMACIÓN PERMANENTE	22
6.2.1. Deformación permanente en la subrasante.	25

6.3. MODELO DE MÓDULOS RESILIENTES EN MATERIAL GRANULAR	28
6.4. MODELACIÓN NUMÉRICA	31
6.4.1. Estudio de subrasante para un pavimento flexible.....	31
7. ESTADO DEL ARTE	32
8. METODOLOGÍA.....	36
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
10. CONCLUSIONES.....	48
11. RECOMENDACIONES.....	49
12. ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACIÓN.....	50
13. BIBLIOGRAFÍA	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición de las cenizas volantes.....	15
Tabla 2. Comparación de cantidad y composición química típica de cenizas	16
Tabla 3. Parámetros de resistencia CBR en curado de 28 días	20
Tabla 4. Límites de Atterberg y características de compactación de las muestras	21
Tabla 5. Módulos elásticos (MPa) de la subrasante.....	27
Tabla 6. Categorías de la subrasante	31
Tabla 7. Características de los materiales utilizados.....	33
Tabla 8. Muestra de ceniza volante estabilizada con porcentajes de cal	34
Tabla 9. Obtención de módulo resiliente para la subrasantes control y modificadas	37
Tabla 10. Propiedades elásticas de los materiales en el pavimento de control	38
Tabla 11. Deformación vertical (ϵ_c) hallada por Abaqus	45
Tabla 12. Ecuación de números de ejes equivalentes	45
Tabla 13. Número de ejes equivalentes y nivel de tránsito.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción y uso de ceniza volante de carbón	5
Figura 2. Secciones de prueba.....	7
Figura 3. Proceso industrial de carbón para obtención de ceniza	14
Figura 4. Morfología de la ceniza volante.	17
Figura 5. Generación y utilización de ceniza volante en China.....	18
Figura 6. Generación y utilización de ceniza volante en India	19
Figura 7. Generación y utilización de ceniza volante en Estados Unidos	19
Figura 8. Esfuerzos de un elemento de pavimento bajo una carga en movimiento	22
Figura 9. Deformación con el número de ciclos en materiales granulares	23
Figura 10. Esfuerzo-deformación en ciclos iniciales de carga para material granular en estado no resiliente	24
Figura 11. Comportamiento esfuerzo-deformación en un ciclo de carga para un material granular en estado resiliente.....	25
Figura 12. Parámetro crítico y ubicación para capas seleccionadas y de subrasante.....	26
Figura 13. Ajuste de modelo $k-\theta$	30
Figura 14. Modelo de módulo resiliente para 2% de ceniza volante y cal.....	34
Figura 15. Fases de la metodología.....	36
Figura 16. Geometría del pavimento para la modelación numérica	39
Figura 17. Condiciones de borde y enmallado de las capas.....	42
Figura 18. Análisis de carga en la superficie de la subrasante de control.....	42
Figura 19. Análisis de carga en la superficie de la subrasante estabilizada al 2%	43
Figura 20. Análisis de carga en la superficie de la subrasante estabilizada al 4%	43
Figura 21. Análisis de carga en la superficie de la subrasante estabilizada al 8%	44
Figura 22. Análisis de carga en la superficie de la subrasante estabilizada al 10%	44

GLOSARIO

ABAQUS: Es un software que utiliza la teoría de elementos finitos para el análisis de estructuras, con este es posible obtener las respuestas mecánicas del pavimento flexible.

CAL: Es una sustancia alcalina de color blanco o blanco grisáceo que al contacto con el agua se hidrata. Su mayor aplicación en la construcción es como componente, mezclada con arena en la elaboración de morteros y/o estabilizaciones de suelos.

CARGA DINÁMICA: Son las cargas generadas por el desplazamiento de los vehículos y varían de forma constante en un pavimento, se manifiestan como un incremento local en la carga total sobre el pavimento.

CENIZA VOLANTE: Son los residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbon pulverizado.

ESTABILIZACIÓN: Son métodos que mejoran la resistencia del suelo incluyendo procesos físicos-químicos que aumentan la cohesión y/o la fricción de la mezcla del suelo modificado.

MICRA: (μm) Es una unidad de longitud equivalente a una milésima parte de un milímetro.

MÓDULO RESILIENTE: Proporciona la relación entre la deformación que se puede sustituir y el esfuerzo, se aplica en procedimientos analíticos que incluyen cargas dinámicas y requieren un módulo de elasticidad.

PAVIMENTO: Es una superficie terrestre que se forma por una o más capas, puede ser de material granular o aplicar también otros aditivos para mejorar sus características mecánicas y así poder transportar eficientemente por esta de un lugar a otro.

PAVIMENTO FLEXIBLE: Es una estructura que se deflece o flexiona dependiendo de las cargas que lo transitan, el uso de pavimentos flexibles (base granular) se realiza fundamentalmente en zonas de abundante tráfico.

RELACIÓN DE POISSON: El coeficiente de Poisson (ν) es un parámetro que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que actúa en un material de manera perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo.

SUELO GRANULAR: Están formados por partículas gruesas como la arena o la grava. Cuando el suelo es menos cohesivo, se necesita llevar adelante mayores medidas para prevenir un derrumbe.

SUBRASANTE: Es el suelo que se utiliza para realizar el diseño de un pavimento multicapa, teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas se pueden emplear diferentes aditivos para el mejoramiento de su uso.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS Y SÍMBOLOS

SIGLAS Y ABREVIATURAS

ACAA:	Asociación Americana de Cenizas de Carbón
ASTM:	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
AASHTO:	Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes
CBR:	California Bearing Ratio.
E.E.U.U.:	Estados Unidos.
INVIAS:	Instituto nacional de vías.
FEM:	Modelación con elementos finitos.
Gs:	Gravedad específica
IP:	Índice de plasticidad
LL:	Límite líquido
LP:	Límite plástico

LETRAS LATINAS

MPa:	Megapascal
kPa:	Kilopascal
kN:	Kilonewton
N:	Newton
<i>N_d</i> :	Número de ejes equivalentes
n:	Coefficiente de Poisson
MR:	Módulo resiliente (E)
D:	Densidad seca
W:	Humedad

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo principal evaluar las propiedades resilientes de una capa subrasante estabilizada con ceniza volante para un pavimento flexible convencional, se realizó una revisión literaria entre diversos autores locales e internacionales que desarrollaron pruebas de laboratorio propias de la investigación, evaluando las propiedades mecánicas en la estabilización de suelos empleando cenizas volantes y/o cal. Mediante el software de modelación de elementos finitos Abaqus, se evaluó la influencia del aporte estructural a través del análisis elástico lineal multicapa de las propiedades resilientes en un pavimento flexible convencional estabilizando la capa subrasante con cuatro (4) diferentes dosificaciones de ceniza y cal, obteniendo mejorías en las deformaciones verticales a nivel de subrasante y en el nivel de servicio de la vía.

PALABRAS CLAVE: Abaqus, ceniza volante, cal, subrasante, módulo resiliente, deformación, pavimento flexible, estabilización.

ABSTRACT

The main objective of this research is evaluate the resilient properties of subgrade layer stabilized with fly ash for a conventional flexible pavement, a literary review was carried out reviewing some local and international authors who developed laboratory test to evaluating the mechanical properties in soil stabilization using fly ash and/or lime. Using the finite element modeling software Abaqus, the influence of the structural contribution was evaluated through the multilayer linear elastic analysis of the resilient properties in a conventional flexible pavement, stabilizing the subgrade layer with four (4) different dosages of fly ash and lime, obtaining improvements in vertical deformations at the subgrade level and in the road service level.

KEY WORDS: Abaqus, fly ash, lime, subgrade, resilient modulus, deformation, flexible pavement, stabilization.

1. INTRODUCCIÓN

El almacenamiento residual de ceniza volante en las plantas termoeléctricas del país genera un impacto negativo tanto ambiental como económico. Al utilizarlo en aplicaciones geotécnicas como aditivo estabilizante, incrementa las propiedades mecánicas del suelo y se disminuye el volumen que se encuentra almacenado; esto conlleva a “mitigar problemas de salud con las partículas que son desplazadas a los sectores cercanos”¹.

Según Urrego ², las cenizas volantes son partículas finas residuales, subproducto de la combustión del carbón bituminoso que se utiliza para generar la electricidad que se produce en las centrales termoeléctricas de las 15 existentes en el país. Estas experimentan reacciones puzolánicas y de hidratación que aplicadas como agente estabilizador en cantidades inferiores al 35% de su peso, mejora la trabajabilidad, capacidad de paso y de relleno.

Existen diferentes tipos de cenizas volantes, entre ellas las más relevantes son: Clase F; que son producidas por la calcinación de carbón bituminoso; presentan propiedades puzolánicas, contienen pequeñas cantidades de cal normalmente inferior al 15% y tiene mayor combinación de sílice, aluminio y hierro.

Según Ozdemir ³, también se encuentran clase C; las cuales son producidas por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito, contienen una mayor cantidad de cal, generalmente entre 15% y 30%, presentan propiedades puzolánicas y cementicias, que contribuye a la propiedad

¹ Bhatt, A., Priyadarshini, S., Acharath Mohanakrishnan, A., Abri, A., Sattler, M., & Techapaphawit, S. (2019). Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00263.

² Silva Urrego, Y. F., & Delvasto Arjona, S. (2018, March 5). *Concreto autocompactante con materiales cementicios suplementarios de Colombia*.

³ Ozdemir, M. A. (2016). Improvement in Bearing Capacity of a Soft Soil by Addition of Fly Ash. *Procedia Engineering*, 143, 498–505.

de autocementación en presencia de agua, es por esto que la adición de cenizas volantes como aditivo estabilizador es muy positiva.

Así mismo, existe una gran variedad de suelos que poseen características mecánicas óptimas para la ingeniería, y en otros casos, sus propiedades son inferiores debido a la baja resistencia y/o alta compresibilidad; por lo tanto, se pueden emplear distintos métodos de estabilización para mejorar sus propiedades mecánicas. Las cenizas volantes como aditivo estabilizador contienen propiedades que, al ser mezcladas homogéneamente en una capa de suelo, mejoran la estabilidad del mismo, aumentan su resistencia y disminuye la deformación bajo las cargas impuestas.

Según Andavan ⁴, los principales métodos de estabilización permiten controlar la expansión del suelo, reducir su plasticidad e incrementar la resistencia del mismo, esto a su vez disminuye la compresibilidad para lograr una estabilización óptima. La aplicación de ceniza volante clase F y otro agente estabilizador encontrado como la cal, contienen compuestos de sílice y aluminio, y al mezclarlos con agua forman una masa cementada que llenan los vacíos del suelo granular a tratar. Para este tipo de muestras se aplica relaciones de contenido de ceniza volante entre el 10 y el 20% con un contenido de cal entre el 2 y el 4% que permiten encontrar la máxima resistencia posible. Las estructuras de pavimento en las capas inferiores con un suelo inestable muestran alteraciones tempranas que causan la falla prematura del asfalto, el mejoramiento de estos suelos es una práctica típica en la ingeniería para mejorar su vida útil. El suelo modificado con cal aumenta eficazmente la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del mismo, simultáneamente mejora la compresibilidad del suelo. Se observó un comportamiento de fluctuación sobre la influencia de la cal en la permeabilidad del suelo, sin embargo, los factores que afectan la permeabilidad de la mezcla entre la subrasante y la cal deben estudiarse ampliamente.

⁴ Andavan, S., & Pagadala, V. K. (2020). *A study on soil stabilization by addition of fly ash and lime*. 22, 1125–1129.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Evaluar la influencia de las propiedades resilientes de subrasante estabilizadas con ceniza volante sobre la deformación permanente en pavimentos flexibles.

2.2. ESPECÍFICOS

- Definir los parámetros de resiliencia de una mezcla homogénea con ceniza volante de una capa subrasante a partir de revisiones literarias.
- Realizar un análisis comparativo de las diferentes metodologías de dosificación de mezclas a partir de resultados e investigaciones.
- Evaluar el aporte estructural de acuerdo a los parámetros examinados anteriormente, empleando un análisis elástico lineal multicapa por medio del software de modelación de elementos finitos Abaqus.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

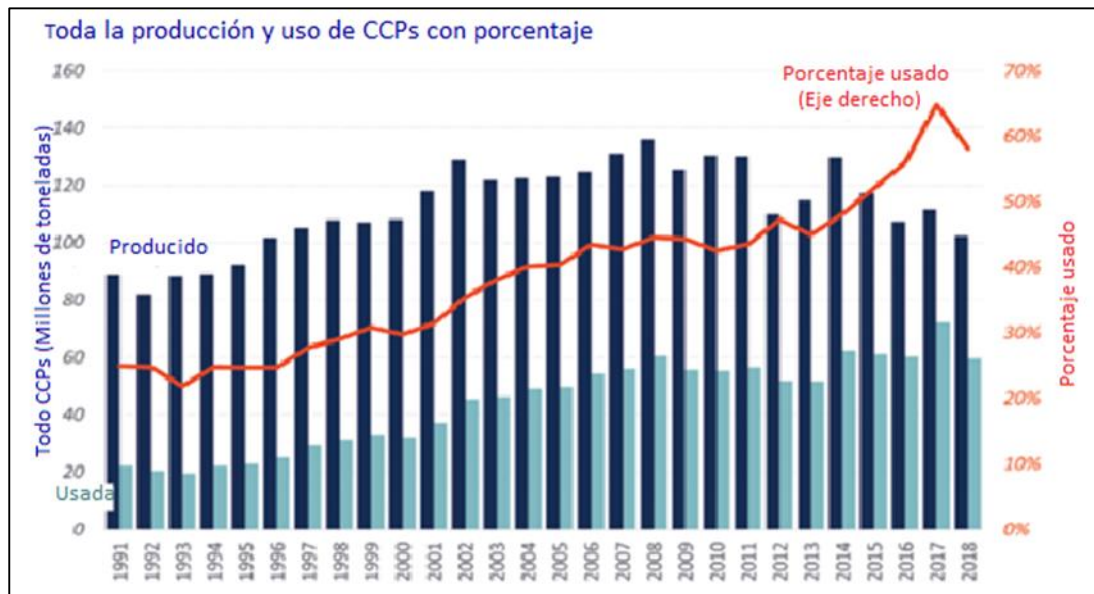
A través de una revisión literaria de bibliografías, documentos e investigaciones, se compararon los resultados de pruebas de laboratorio evaluando el comportamiento de una capa subrasante para un pavimento flexible convencional y una capa subrasante estabilizada a diferentes porcentajes de ceniza volante. Se evaluaron las propiedades físicas, mecánicas y los comportamientos resilientes de la capa subrasante estabilizada teniendo en cuenta que estos dependen de la tixotropía, métodos de compactación, entre otras.

Según Mackiewicz ⁵, los carbones y muchos lignitos tienen bajas concentraciones de compuestos de calcio, la ceniza volante clase F, no exhibe propiedades de autocementación, sin embargo, con la adición de un activador como la cal, se producirá una reacción puzolánica en las cenizas volantes de clase F generando propiedades cementosas, y así utilizar como agentes de secado para facilitar la compactación de los materiales.

Las cenizas volantes se constituyen como un residuo ecológicamente problemático que deben eliminar las centrales termoeléctricas evitando que permanezcan en los depósitos donde son almacenadas y ubicadas al aire libre, como se muestra en la Figura 1.

⁵ Mackiewicz, S. M., & Ferguson, E. G. (2005). Stabilization of Soil with Self-Cementing Coal Ashes. *2005 World of Coal Ash (WOCA), April 11-15, 2005, Lexington, Kentucky, USA*, 1–7.

Figura 1. Producción y uso de ceniza volante de carbón



Fuente: (Asociación Estadounidense de Cenizas de Carbón, 2017)

Según Yao ⁶, siendo la contaminación ambiental un cambio indeseable en las características físicas, químicas o biológicas del aire, el agua, el suelo y otros factores ambientales que pueden afectar de manera adversa la salud, la supervivencia y las actividades de los seres vivos, existe una necesidad apremiante de continuar con el desarrollo de nuevos métodos de reciclaje para la ceniza volante de carbón y su aplicación en la mejora del suelo.

¿Cuál es la influencia sobre las propiedades mecánicas y resilientes de una mezcla homogénea de suelo granular estabilizado con ceniza volante y cal para una capa subrasante?

⁶ Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 141, pp. 105–121). Elsevier.

4. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

4.1. ANTECEDENTES

“Desde 1968, la Asociación Americana de Cenizas de Carbón (ACAA), ha realizado un seguimiento de la producción y el uso de todo tipo de cenizas de carbón. Estas encuestas están destinadas a mostrar patrones de uso generales y los datos de ACAA han sido aceptados por la industria y numerosas agencias gubernamentales como las mejores métricas disponibles de prácticas de uso beneficioso”⁷.

Según ACAA ⁸, el 58% de la ceniza de carbón producida durante el 2018 se recicló, la Asociación Estadounidense de Constructores de Carreteras y Transporte estima que el uso de cenizas volantes de carbón en carreteras ahorra \$5.2 mil millones USD por año en costos de construcción en E.E.U.U. Las prácticas de construcción son vitales para proteger el entorno natural y la viabilidad económica a largo plazo, es por esto que la sustitución de materiales industriales reciclados en la aplicación de la construcción, resulta ser un gran impacto ambiental y económico; generan menores costos, alto rendimiento técnico y mayor longevidad.

Las cenizas volantes se combinan con materiales del suelo para mejorar las especificaciones de compactación, la resistencia a la compresión y otras consideraciones geotécnicas importantes al momento de estabilizar una capa subrasante para una vía. Las aplicaciones geotécnicas de un suelo incluyen estabilizaciones, relleno estructural y terraplenes, esto proporciona alternativas económicas altamente efectivas. Los materiales excavados se retiran inmediatamente y se colocan rellenos estabilizados con ceniza volante.

⁷ ACAA. (2020). *Asociación Americana de Cenizas de Carbón*. <https://www.acaa-usa.org/>

⁸ ACAA. (2020). *Asociación Americana de Cenizas de Carbón*. <https://www.acaa-usa.org/>

Figura 2. Secciones de prueba



Fuente: (Departamento de Transporte de Minnesota, 2008)

Según ACAA ⁹, un estudio patrocinado por el Departamento de energía de Estados Unidos, comparó la resistencia, el costo y los efectos ambientales de una capa base de materiales estabilizados con cenizas volantes con alto contenido de carbono, donde se construyeron 3 secciones de prueba, ver Figura 2, se realizó en las instalaciones del laboratorio al aire libre de Minnesota Road Research Project, operado por el departamento de transportes, cada una con una longitud de aproximadamente 153 metros. Las tres secciones tenían superficie de asfalto, subbase y una capa subrasante, pero esta última, con un material modificado en una de las secciones. Las cenizas volantes utilizadas, provenían de la unidad 8 de la planta generadora Riverside de Xcel, en St. Paul, Minnesota, y contenían un contenido de carbono del 16,35% y un contenido de óxido de calcio del 22,37%.

Después de construidas las tres secciones, las capas no modificadas tuvieron que ser reemplazadas debido a las fuertes lluvias, lo que generó costos adicionales. La capa subrasante modificada con ceniza volante no se vio afectada, lo que determinó que

⁹ ACAA. (2020). *Asociación Americana de Cenizas de Carbón*. <https://www.acaa-usa.org/>

efectivamente su costo de producción fue más bajo. Durante y después de las tres secciones de construcción de las vías, se realizaron pruebas de laboratorio y pruebas de campo para caracterizar el material. “Las pruebas mostraron que las capas estabilizadas con cenizas volantes tenían un módulo más alto que las del agregado triturado; según la predicción de rendimiento de la guía de diseño de pavimento empírico - mecánico, las capas modificadas tienen una vida útil de 23.5 años, más del doble de la vida útil de la base sin modificar”¹⁰.

El análisis indicó que el uso de capas estabilizadas con ceniza volante para un pavimento flexible reduce los costos del ciclo de vida y las emisiones de gases de efecto invernadero. La principal fuente de producción de energía en Colombia son las termoeléctricas debido a su alto índice de reserva de carbón, esta combustión genera residuos contaminantes de cenizas volantes para el medio ambiente.

La clasificación principal se denomina en dos clases, ceniza volante clase F y clase C, su característica diferencial es la variación de contenido de calcio en cada una de ellas. “Las cenizas volantes clase F son producidas por la combustión de carbones bituminosos o antracíticos y su contenido mínimo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ es del 70%, usualmente menos del 10% de calcio (propiedades puzolánicas y valor cementante nulo) y con porcentaje de contenido no quemado entre el 2 y el 10%”¹¹

Los resultados indican que estas cenizas volantes poseen una influencia favorable como aditivo debido a la presencia de aluminosilicatos propios de la ceniza, y conllevan a tener un impacto positivo con los hidróxidos de calcio. Las cenizas volantes clase C, tienen características autocementantes y no requiere de elementos activadores como la cal o

¹⁰ ACAA. (2020). *Asociación Americana de Cenizas de Carbón*. <https://www.aaa-usa.org/>

¹¹ Bautista-Ruiz, W. A. (2017). Characterization of flying ashes of a thermoelectric plant for its possible use as an additive in the manufacture of cement Mercedes Díaz-Lagos 2 Segundo Agustín Martínez-Ovalle 3. *Rev. Investig. Desarro. Innov*, 8(1), 135–146.

cemento portland, ya que, al tener contacto con el agua, se hidratan formando productos cementosos similares al resultado obtenido durante la hidratación del cemento portland, esto hace que sea un material eficaz y económico para su uso en la estabilización de suelos. Según Mackiewicz ¹², esta clase de ceniza suele tener concentraciones mayores de carbonato de calcio, entre el 20 al 30%. En algunas aplicaciones de ceniza volante clase C, se debe tener en cuenta la rápida tasa de hidratación, y es considerable tener que controlar con retardadores que impacten en sus propiedades cementosas.

Adicionalmente, en Nigeria, se realizaron pruebas de ensayo en tres tipos de suelos y se demostró que al agregar ceniza volante como aditivo, las propiedades geotécnicas investigadas mejoran sus rendimiento y utilidad siendo el caso para el diseño de pavimentos de carreteras y construcción; en otras palabras, “el aumento del contenido de cenizas volantes de carbón trajo consigo mejoras crecientes en la plasticidad y la mecánica propiedades de los suelos”¹³.

El NLA ¹⁴, encontró que al tener un suelo con 0% de cenizas volantes y otro con 12.5%, se haya reducción en límites líquidos (39.0 a 33.3%), reducción en índice de plasticidad (15.3 a 9.3%), reducción en contenido óptimo de humedad (15.8 a 9.7%), aumento de densidades secas máximas (1920 a 2180 kg/m³) y aumento de CBR sin sumergir, de 20.0% a 53.0%.

La utilización de cal para estabilizar y/o modificar un suelo, se remontan a las décadas entre 1950 y 1960, desde allí, se han realizado variedades en la dosificación de mezclas que se ajustan a los objetivos del diseño de un pavimento, estos procedimientos fueron destinados a asegurar que la resistencia y durabilidad a largo plazo de un suelo estabilizado con cal sea

¹² Mackiewicz, S. M., & Ferguson, E. G. (2005). Stabilization of Soil with Self-Cementing Coal Ashes. *2005 World of Coal Ash (WOCA), April 11-15, 2005, Lexington, Kentucky, USA*, 1–7.

¹³ Okunade, E. A. (2010). Geotechnical Properties of Some Coal Fly Ash Stabilized Southwestern Nigeria Lateritic Soils. *Modern Applied Science*, 4(12), p66.

¹⁴ NLA. (2020). *The National Lime Association – NLA – NLA’s mission is to represent, protect, and promote the nation’s lime industry*. <https://www.lime.org/>

altamente eficiente. Todavía cabe señalar, que la cal tiene una serie de efectos cuando se agrega al suelo, desde el secado del mismo hasta mejorar sus propiedades mecánicas, para obtener una óptima mezcla de estabilización.

Generalmente, la cal es relacionada en el sector de la construcción para el uso de estabilización de suelos y materiales de cimentación. En 2003, se utilizaron más de 1,6 millones de toneladas métricas de cal para la estabilización del suelo en los Estados Unidos. La aplicación de Cal se usa para tratar suelos problemáticos en la capa subrasante, mediante la mejora significativa en las propiedades mecánicas del suelo, reducción de plasticidad, ganancia de resistencia y mejor trabajabilidad. “Los suelos estabilizados con cal fallan a tensiones de desvío mucho más altas que sus contrapartes no estabilizadas y tienen una deformación mucho menor; típicamente alrededor del 1% de deformación para la mezcla estabilizada vs aproximadamente el 3% para el material no estabilizado”¹⁵.

¹⁵ NLA. (2020). *The National Lime Association – NLA – NLA’s mission is to represent, protect, and promote the nation’s lime industry*. <https://www.lime.org/>

4.2. JUSTIFICACIÓN

Los suelos inestables pueden crear problemas importantes en los pavimentos, pero con el diseño y las técnicas de construcción adecuadas, el tratamiento con ceniza volante y/o cal transforman químicamente los suelos inestables en materiales utilizables. La resistencia estructural de los suelos estabilizados debe tenerse en cuenta en los diseños de pavimentos, cambiando elocuentemente las características de un suelo para producir resistencia y estabilidad permanentes a largo plazo en el diseño del pavimento.

Según NLA ¹⁶, la modificación de una capa subrasante con cal proporciona mejoras significativas en estabilización, a menudo induce un aumento de rigidez del 1,000% o más y una reducción significativa de la deformación en caso de falla en comparación con los suelos no tratados. Según Little ¹⁷, la revisión de la literatura indica mejoras de rigidez, resiliencia en los suelos a través de la estabilización con cal, los módulos resilientes son típicamente de 2 a 3 veces mayor que el módulo estático.

Según Mackiewicz ¹⁸, el empleo de cenizas volantes como un material aditivo, ofrece un incremento en parámetros de resistencia a la tracción y estabilidad en la capa subrasante de un suelo. El tratamiento de cenizas volantes es más económico que la cal y algunas alternativas de cemento, incluso cuando se deben agregar mayores cantidades de cenizas para lograr la estabilización necesaria. Según ACAA ¹⁹, la cantidad de productos de combustión de carbón que se utilizan de manera beneficiosa ha aumentado constantemente y ahora constituye alrededor del 43% de todos los productos de combustión de carbón producidos.

¹⁶ NLA. (2020). *The National Lime Association – NLA – NLA’s mission is to represent, protect, and promote the nation’s lime industry*. <https://www.lime.org/>

¹⁷ Little, D. N. (1995). Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. *National Lime Association*, 219.

¹⁸ Mackiewicz, S. M., & Ferguson, E. G. (2005). Stabilization of Soil with Self-Cementing Coal Ashes. *2005 World of Coal Ash (WOCA), April 11-15, 2005, Lexington, Kentucky, USA*, 1–7.

¹⁹ ACAA. (2020). *Asociación Americana de Cenizas de Carbón*. <https://www.acaa-usa.org/>

5. ALCANCES Y LIMITACIONES

5.1. ALCANCES

El desarrollo de esta investigación permite evaluar la influencia de las propiedades resilientes aplicando ceniza volante y cal como material estabilizante en la capa subrasante de un pavimento flexible convencional empleando un software para modelación con elementos finitos, Abaqus.

5.2. LIMITACIONES

Este trabajo de investigación se mantiene al margen de los parámetros de resiliencia aplicados en la capa subrasante para pavimentos flexibles en búsqueda del aporte estructural que resulta de la estabilización con aditivos como cal y/o ceniza volante. Cabe señalar que resulta de la búsqueda de literatura encontrada a nivel internacional para poder evaluar un análisis elástico lineal multicapa por medio del software de modelación de elementos finitos Abaqus. Se utilizó una sumatoria de esfuerzos invariantes de 500 kPa, para esta investigación se asume que los materiales se comportan de tipo isotrópico, homogéneo, elástico lineal.

6. MARCO TEÓRICO

Según Rahhal ²⁰, en la actualidad, las cenizas volantes son utilizadas para la creación de cemento y otros propósitos, contiene componentes de sílice y aluminio, permitiendo influencias en el estado fresco, secado de las mezclas y la fácil compactación de materiales. “Dichas influencias provienen tanto de la morfología de sus partículas como de su composición química. En general contienen una fase vítrea reactiva constituida principalmente por alúmina y sílice mencionado anteriormente que da origen a su carácter químico; las hace aptas para desempeñarse mejor o peor a diferentes medios agresivos”.

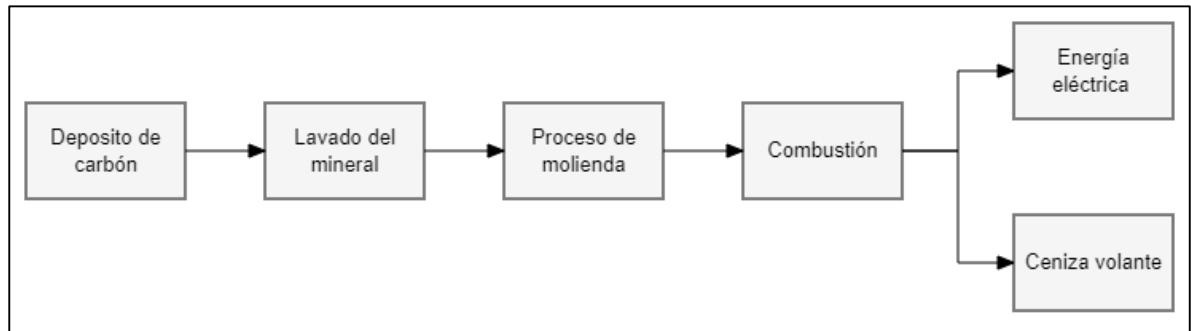
6.1. CENIZAS VOLANTES

6.1.1. Origen.

Los estudios asumen que las cenizas volantes tienen un origen industrial como: termoeléctricas, industrias de madera, etc. En las industrias de energía también llamadas termoeléctricas, la energía producida es obtenida mediante la calcinación de carbón a grandes temperaturas, generando residuos llamados cenizas volantes; en la Figura 3 se presenta los procesos que tienen lugar en las termoeléctricas para la obtención de cenizas volantes.

²⁰ Rahhal, V., Pedrajas, C., Irassar, E., & Talero Morales, R. (2014). Efecto de puzolanas naturales sobre la reología de pastas de cemento portland. *Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo*, 5(2), 2–11.

Figura 3. Proceso industrial de carbón para obtención de ceniza



Fuente: (Beneze-Pierre, 2008)

La función del carbón en el proceso de la generación de energía en las centrales termoeléctricas inicia desde la obtención del material bituminoso, el combustible se usa para calentar agua en una caldera que se transforma en vapor y se dirige hacia la turbina, a través de las presiones consigue que se mueva el eje que la atraviesa, este eje va conectado al generador que convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

6.1.2. Tipos.

Las cenizas volantes se clasifican en diferentes clases, atendiendo principalmente a su contenido en cal y según la norma ASTM C618-08a se definen:

- Clase F: Producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso, contienen pequeñas cantidades de cal, generalmente inferiores al 15% y mayor combinación de sílice, aluminio y hierro, ver Tabla 1.
- Clase C: Son producidas por la calcinación de carbón subbituminoso o lignito, contienen una mayor cantidad de cal, generalmente entre 15% y 30% (Centro de estudios y experimentación de obras públicas (CEDEX), ministerio de fomento). Las cenizas volantes de clase C presentan propiedades puzolánicas que tiene como capacidad para reaccionar con el hidróxido de calcio para formar compuestos similares a los generados durante la hidratación del Clinker.

Las cenizas clase C actualmente no son muy utilizadas en el mercado, ya que las reacciones puzolánicas que trae inicialmente presenta propiedades de autocementación a corto plazo, solicitando retardantes como aditivo permitiendo el retraso de dicha propiedad como agente estabilizador y elevando los costos en la construcción. En cambio, las cenizas clase F pueden ser maleables, ya que al aplicar cal se logra obtener la propiedad de autocementación, permitiendo tener el control de la mezcla y así concebir este proceso más económico.

Tabla 1. Composición de las cenizas volantes.

Compuesto	Comp.% Wt	Compuesto	Comp.% Wt	Compuesto	Comp.% Wt
SiO ₂	64.87	TiO ₂	1.20	SrO	0.11
Al ₂ O ₃	24.62	P ₂ O ₅	0.66	BaO	0.10
Fe ₂ O ₃	4.51	Na ₂ O	0.52	CuO	0.09
K ₂ O	1.36	MgO	0.40	V ₂ O ₅	0.05
CaO	1.33	SO ₃	0.12	Zr ₂ O ₂	0.03

Fuente: (Bautista-Ruiz, 2017)

En Colombia, “Los análisis revelan que las cenizas volantes de la planta de la termoeléctrica de Paipa están constituidas por cenizas de clase F, debido a que tiene $\geq 70\%$ de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ con una relación Si/Al del (2.63) y bajos contenidos de otros elementos como: K, Ca, Ti, P, Na, Mg, S, Sr, Ba, Cu, V y Zr. Es de esperar esta clase de cenizas volantes ya que el carbón que llega a la termoeléctrica de Paipa es de tipo bituminoso”²¹.

En la Tabla 2, se evidencia el porcentaje de ceniza volante y su composición para tres diferentes combustibles como: madera, corteza y cereales. Según Melissari ²², la composición está dominada por SiO₂ y CaO y en menor medida por Magnesio, Aluminio, Potasio.

²¹ Bautista-Ruiz, W. A. (2017). Characterization of flying ashes of a thermoelectric plant for its possible use as an additive in the manufacture of cement Mercedes Díaz-Lagos 2 Segundo Agustín Martínez-Ovalle 3. *Rev. Investig. Desarro. Innov*, 8(1), 135–146.

²² Melissari, B. (2012). *Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa*.

Tabla 2. Comparación de cantidad y composición química típica de cenizas

	Madera	Corteza	Cereales
Ceniza total	< 2%	3% - 8%	5% - 10%
Composición ceniza %			
SiO ₂	25	25	35-60
Al ₂ O ₃	5	7	2
Fe ₂ O ₃	2	4	2
CaO	45	40	7
MgO	5	7	3
K ₂ O	5	5	20-30
P ₂ O ₅	4	2	6
Contenido de metales pesados en cenizas, en ppm			
Pb	25	25	10
Cd	5	5	1
Zn	400	600	250
V	40	60	5
Cr	50	150	15
Ni	60	100	4

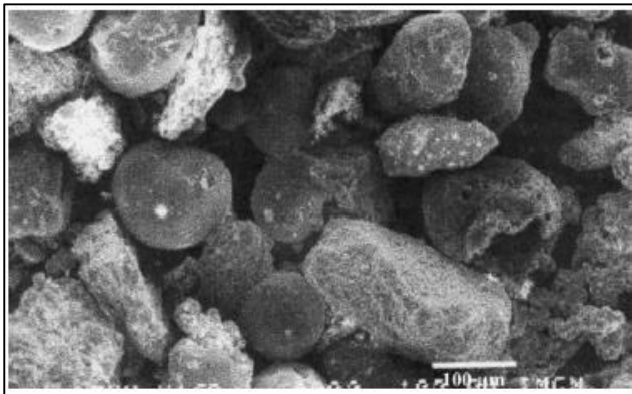
Fuente: (Melissari, 2012)

6.1.3. Caracterización.

Según Bhatt ²³, las cenizas volantes se producen como partículas finas con un tamaño promedio de 20 (µm), y tienen una densidad aparente entre baja y media aproximadamente en (0,54–0,86 g/cm³), alta superficie (300–500 m²/kg) y textura ligera. Su coloración varía entre blanco agua a amarillo y depende del contenido de hierro y carbono no quemado que se almacena en el material. La determinación del pH de las cenizas volantes se clasifica en tres grupos; dependiendo su alcalinidad; cenizas fuertemente alcalinas con un pH entre 11 y 13; cenizas levemente alcalinas con un pH entre 8 y 9; y cenizas acidas con pH menor a 8. La revelación de la micro morfología de las cenizas volantes indica que son partículas esféricas, cenósferas, y generalmente de forma irregular por el contenido de carbono poroso que no fue quemado, de acuerdo a la Figura 4, se aprecian sus diferentes formas de las partículas.

²³ Bhattacharja, S., Bhatt, J. I., & Todres, H. A. (2003). Stabilization of clay soils by portland cement or lime—a critical review of literature. *PCA R&D Serial*, 2066, 60.

Figura 4. Morfología de la ceniza volante.



Fuente: (Benezet, 2008)

La caracterización física de las cenizas volantes tiene un alto grado de complejidad por ser un subproducto resultante de la quema de carbón bituminoso, sus partículas presentan rasgos independientes y en algunos casos no es quemado en su totalidad el carbón. Las cenizas volantes también contienen oligoelementos, tales como Cr, Pb, Ni, Ba, Sr, V y Zn y están en cantidades significativas dentro de las cenizas causando preocupación ambiental al momento de ser almacenadas libremente y/o suspendidas en el aire. En los estudios de análisis de cenizas volantes, se asume que estas consisten en partículas finas y pulverulentas, predominante de forma esférica, sólidas y en su mayoría de naturaleza amorfa.

En general, la gravedad específica (Gs) de las cenizas de carbón es alrededor de 2.0, pero varía en gran medida en 1.6 a 3.1, dicha variación depende del tamaño de las partículas y gradación. Los contenidos óptimos de humedad de cenizas volantes varían del 11 al 53% y los valores máximos de densidad seca varían entre 1.01 a 1.78 g/cm³, “también tornan ser color gris, según la proporción de hierro y carbón sin quemar”²⁴.

²⁴ Bhattacharja, S., Bhatta, J. I., & Todres, H. A. (2003). Stabilization of clay soils by portland cement or lime—a critical review of literature. *PCA R&D Serial*, 2066, 60.

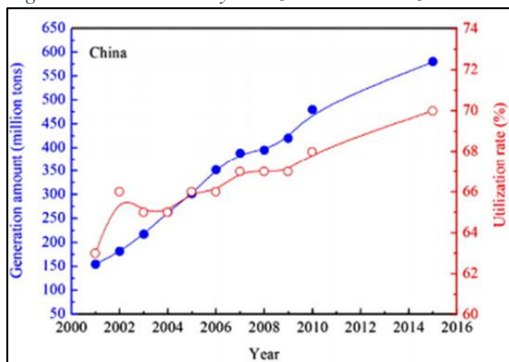
6.1.4. Aplicación.

La utilización de cenizas volantes a nivel de ingeniería se aprovecha en subrasantes de carreteras, mejoras de suelo y en algunos casos se emplea para el uso de rellenos, sin embargo, la demanda ocasionada de ceniza volante en las plantas termoeléctricas es superior al empleo y la reutilización que hoy día se le da al material residual llegando a tener que ser vertido en estanques de cenizas, lagunas o vertederos. El costo de eliminación de la ceniza volante no reutilizada es elevado y los índices de continuación también aumentan a su paso, es por esto, tener que llegar a la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de empleo de la ceniza volante producto del carbón bituminoso en la Ingeniería civil.

6.1.4.1. Aplicaciones integrales.

“El método de reutilización de las cenizas volantes es la mejor alternativa que se puede dar a este material residual, trayendo consigo beneficios ambientales como económicos, es por esto que día a día se reinventan desarrollos y procesos para su aplicación en más campos de la ingeniería civil y aprovechar al máximo los beneficios que brinda el material”²⁵. Se evidencia la generación y utilización de la ceniza volante producida en diferentes partes del mundo; China, ver Figura 5; India, ver Figura 6; y Estados Unidos, ver Figura 7.

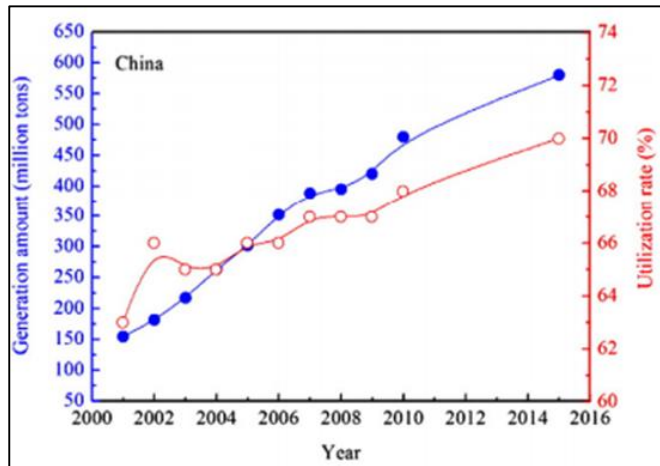
Figura 5. Generación y utilización de ceniza volante en China



Fuente: (Yao, 2015)

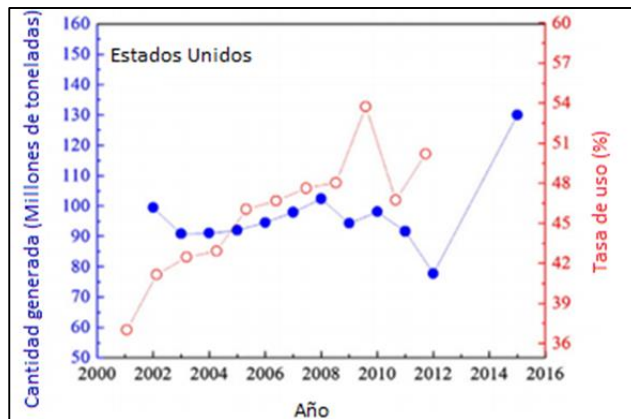
²⁵ Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 141, pp. 105–121). Elsevier.

Figura 6. Generación y utilización de ceniza volante en India



Fuente: (Yao, 2015)

Figura 7. Generación y utilización de ceniza volante en Estados Unidos



Fuente: (Yao, 2015)

Actualmente se utilizan diferentes agentes en la estabilización de suelos, entre ellos se encuentra la cal o el cemento, pero no son tan económicos como las cenizas volantes. “Las propiedades fisicoquímicas de las cenizas volantes de carbón se forman con partículas del tamaño de limo y arcilla, baja densidad aparente, mayor capacidad de retención de agua, pH favorable y fuente de nutrientes esenciales para las plantas”²⁶.

²⁶ Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 141, pp. 105–121). Elsevier.

“Estas propiedades cementantes al entrar en contacto con el agua forman productos cementantes similares a los producidos durante la hidratación del cemento portland, las cenizas volantes son un estabilizador efectivo y económico para el uso en suelos”²⁷.

6.1.4.1. Efectos.

- Aumento en la resistencia por CBR (California Bearing Ratio) mediante el curado.
- Disminuye la densidad seca máxima de la capa de suelo.
- Aumento en la humedad óptima de la capa de suelo.
- Aumento en la resistencia de Compresión Inconfinada.

En la Tabla 3, se puede concluir que a mayor peso de ceniza volante presenta mayor resistencia al CBR y menor hinchamiento del suelo en el curado hasta los 28 días, con un contenido de aditivo de hasta 15 y 20% mostrado anteriormente.

Tabla 3. Parámetros de resistencia CBR en curado de 28 días

Remojo		4 días				
Curado	0 días		7 días		28 días	
Muestra	CBR (%)	Hinchamiento (%)	CBR (%)	Hinchamiento (%)	CBR (%)	Hinchamiento (%)
Inicial	3	5.1	N.A	N.A	N.A	N.A
3% C	5	4.8	7.8	3.5	9.4	2.9
5% C	6.2	5.2	11.9	3.1	20.1	2.3
7% C	6.2	5.1	17.2	3.2	55.5	1.1
10% C	6.8	4.5	85.9	0.7	114.5	0.7
15% C	22.3	4.4	162	0.1	N.A	N.A
20% C	41.6	3.1	246	0.1	N.A	N.A

Fuente: (Ozdemir, 2016)

²⁷ Mackiewicz, S. M., & Ferguson, E. G. (2005). Stabilization of Soil with Self-Cementing Coal Ashes. *2005 World of Coal Ash (WOCA), April 11-15, 2005, Lexington, Kentucky, USA*, 1–7.

En algunos casos es necesario el uso de cal como agente modificador para alterar las propiedades físicas, mecánicas e impermeabilidad en el suelo, siendo más usadas en suelos muy finos como: arcillas y arenas finas, permitiendo controlar la cantidad y retención de agua del suelo hasta su punto de retención de cal, es decir dichos cambios a mayores adiciones no causan cambios apreciables.

“Las puzolanas son materiales silíceos o aluminios-silíceos dependiendo de su composición química tal que la presencia de los tres principales óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), tiene como capacidad de reaccionar con hidróxido de calcio al entrar en contacto con el agua, permitiendo a la actividad puzolánica tener ventajas como: incremento en la permeabilidad por la reducción de grietas en el fraguado, disminución de calor en la hidratación y menor necesidad de agua”²⁸.

En comparación con la Tabla 4, se presenta una reducción de la densidad seca máxima y un aumento en la humedad óptima de la capa de suelo con mayor peso de ceniza volante, el limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad, aumentan directamente con el porcentaje de ceniza volante aplicado en el suelo.

Tabla 4. Límites de Atterberg y características de compactación de las muestras

Muestra	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Clase de suelo	D(g/cm ³)	W(%)
Inicial	65.9	23	11	12	CL	2.188	7.63
3% C	60.8	25	12	13	CL	2.172	7.42
5% C	55.3	26	12	14	CL	2.157	7.20
7% C	51.6	30	14	16	CL	2.145	7.80
10% C	50.2	29	14	15	CL	2.100	8.24

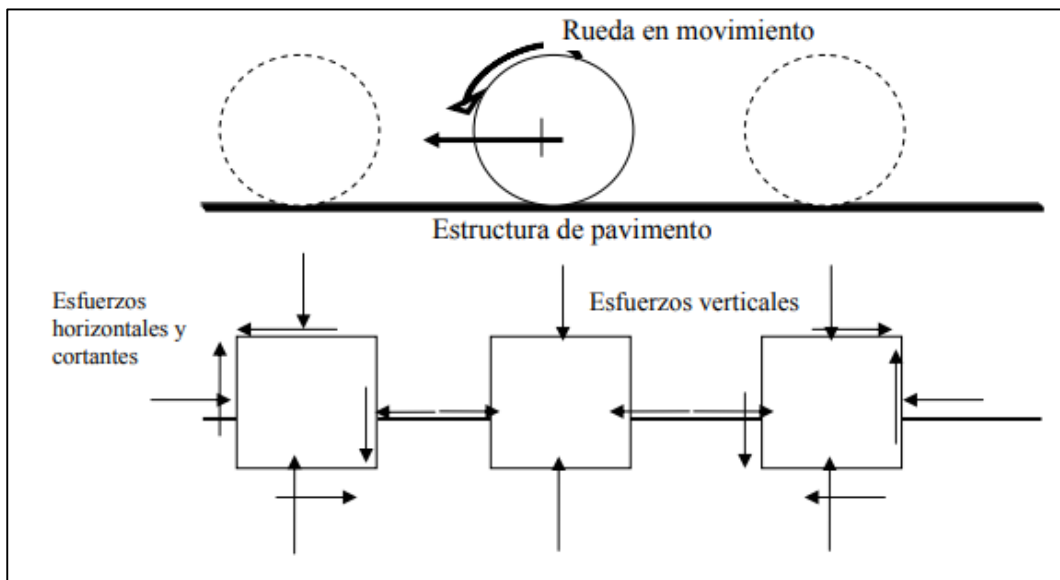
Fuente: (Ozdemir, 2016)

²⁸ Ozdemir, M. A. (2016). Improvement in Bearing Capacity of a Soft Soil by Addition of Fly Ash. *Procedia Engineering*, 143, 498–505.

6.2. DEFORMACIÓN PERMANENTE

El patrón de esfuerzos aplicados a una estructura como finalidad del paso del tráfico de vehículos presenta pulsos de carga que implican esfuerzos normales y cortantes, estos son variables con el tiempo y va cambiando su carga y distribución. Según Garnica ²⁹, los esfuerzos aplicados al pavimento se pueden considerar que la rueda de un vehículo al acercarse a un punto considerado, su esfuerzo irá aumentando con el tiempo hasta llegar a un máximo, al avanzar el vehículo la rueda se alejará del punto considerado y presenta una reducción en el esfuerzo vertical, permitiendo al pavimento recuperarse y con el tiempo su esfuerzo vertical desaparece, este mecanismo se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Esfuerzos de un elemento de pavimento bajo una carga en movimiento



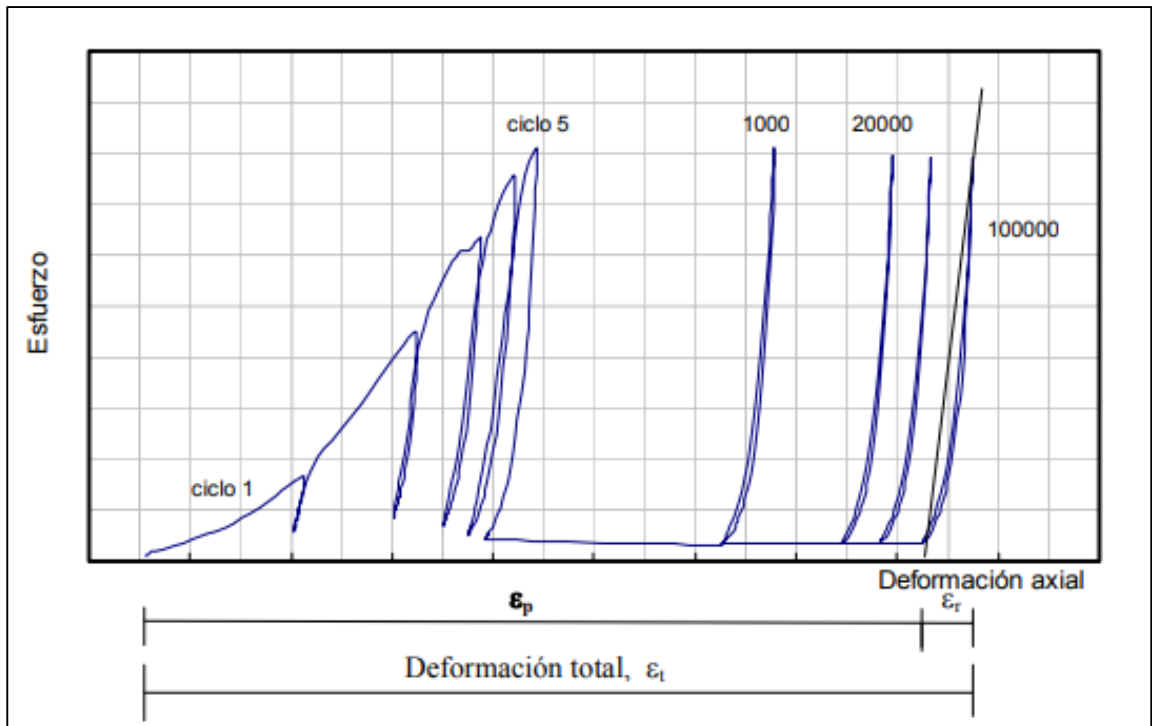
Fuente: (Garnica & Gómez, 2001)

²⁹ Garnica, P., & Gómez, J. A. (2001). *Deformaciones permanentes en materiales granulares para la sección estructural de carreteras*. Publicación Técnica No. 176, 1–46.

“La deformación total, tiene dos componentes: deformación recuperable o elástica, donde se mide una vez la carga deja de actuar en el material, y la deformación permanente, se define como la deformación vertical no recuperable (plástica)”³⁰.

Un material granular sujeto a carga cíclica experimenta una deformación cuya magnitud es función de varios factores como el nivel de carga aplicada, área de contacto, condiciones de confinamiento, características del material, entre otras. La Figura 9 representa los componentes que experimenta un material al ser sometido a diferentes cargas repetidas, en las primeras aplicaciones de carga.

Figura 9. Deformación con el número de ciclos en materiales granulares



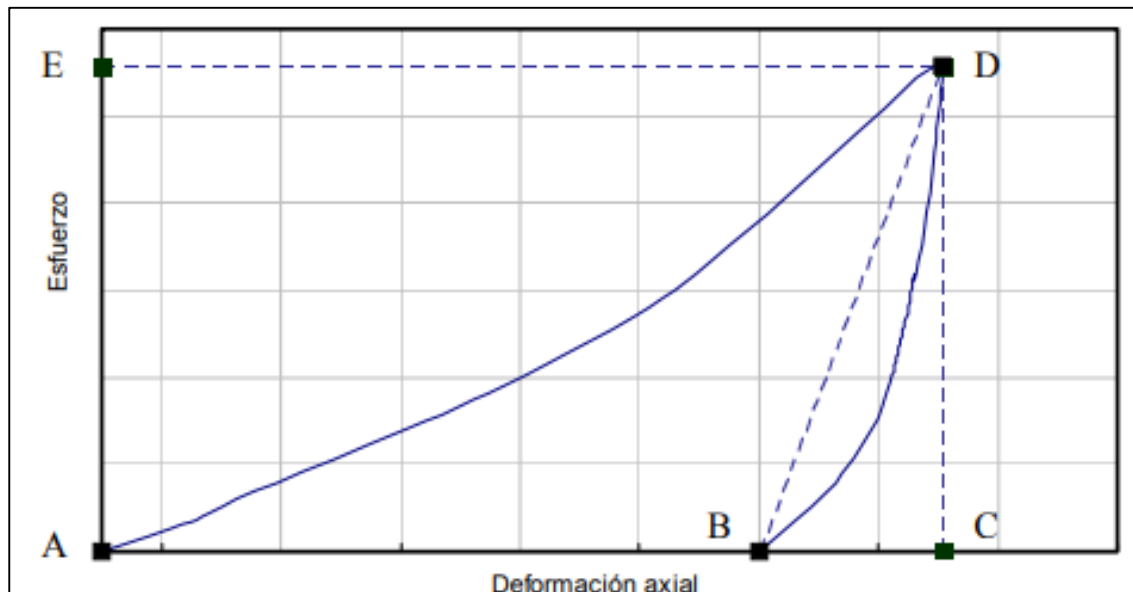
Fuente: (Instituto Mexicano del transporte, 2001)

³⁰ Garnica, P., & Gómez, J. A. (2001). *Deformaciones permanentes en materiales granulares para la sección estructural de carreteras*. Publicación Técnica No. 176, 1–46.

Es bien sabido que la mayoría de los materiales de pavimentación no son elásticos ya que experimentan alguna deformación permanente después de cada aplicación de carga. Sin embargo, si la carga es pequeña comparada con la resistencia del material y se repite un gran número de veces, la deformación bajo cada repetición de carga llega a ser casi completamente recuperable y proporcional a la magnitud de la carga, pudiendo considerarse elástica”³¹.

En la Figura 10, el segmento AC representa la deformación unitaria total del material (ϵ_t), el segmento AB implica a la deformación permanente (ϵ_p), y el segmento BC corresponde a la deformación recuperable o también llamado deformación resiliente. La línea AE representa las magnitudes de esfuerzos aplicado a dicho material, dicha figura corresponde a los datos obtenidos de una prueba de compresión dinámica.

Figura 10. Esfuerzo-deformación en ciclos iniciales de carga para material granular en estado no resiliente

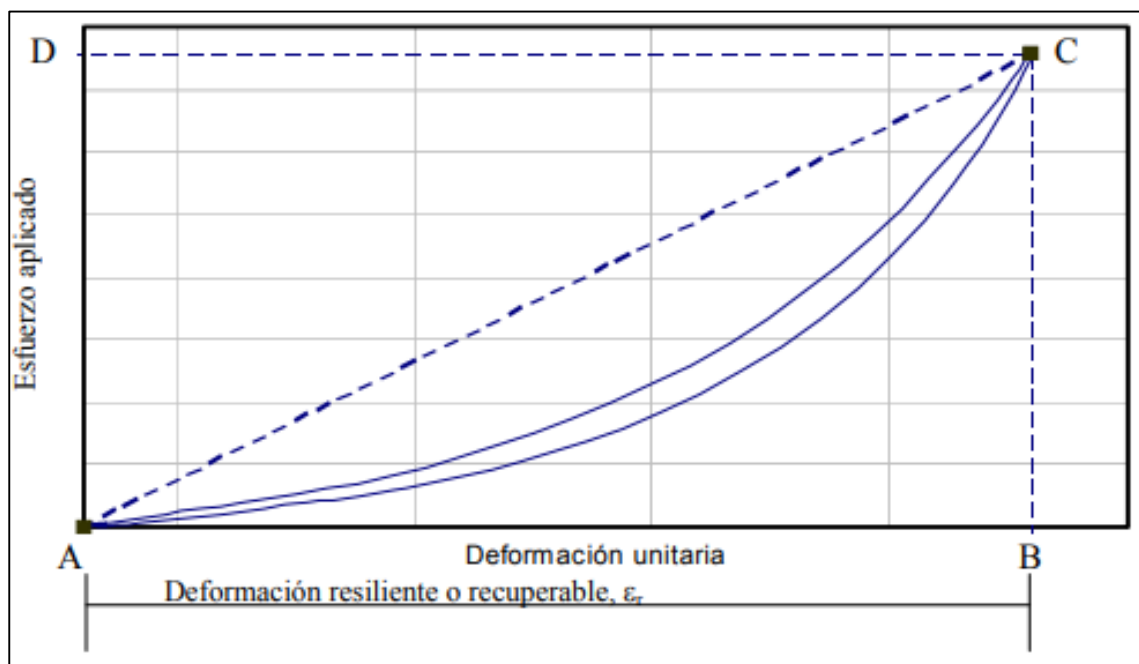


Fuente: (Instituto Mexicano del transporte, 2001)

³¹ Garnica, P., & Gómez, J. A. (2001). *Deformaciones permanentes en materiales granulares para la sección estructural de carreteras. Publicación Técnica No. 176*, 1–46.

Según los datos obtenidos de una prueba de compresión dinámica para un ciclo de carga para un material determinado cuya deformación total es resiliente, se puede indicar que el suelo tiene un comportamiento resiliente, ver Figura 11. En el segmento AB se representa las deformaciones resiliente o recuperable (ϵ_r), el segmento AD representa la magnitud de esfuerzo aplicado al suelo.

Figura 11. Comportamiento esfuerzo-deformación en un ciclo de carga para un material granular en estado resiliente

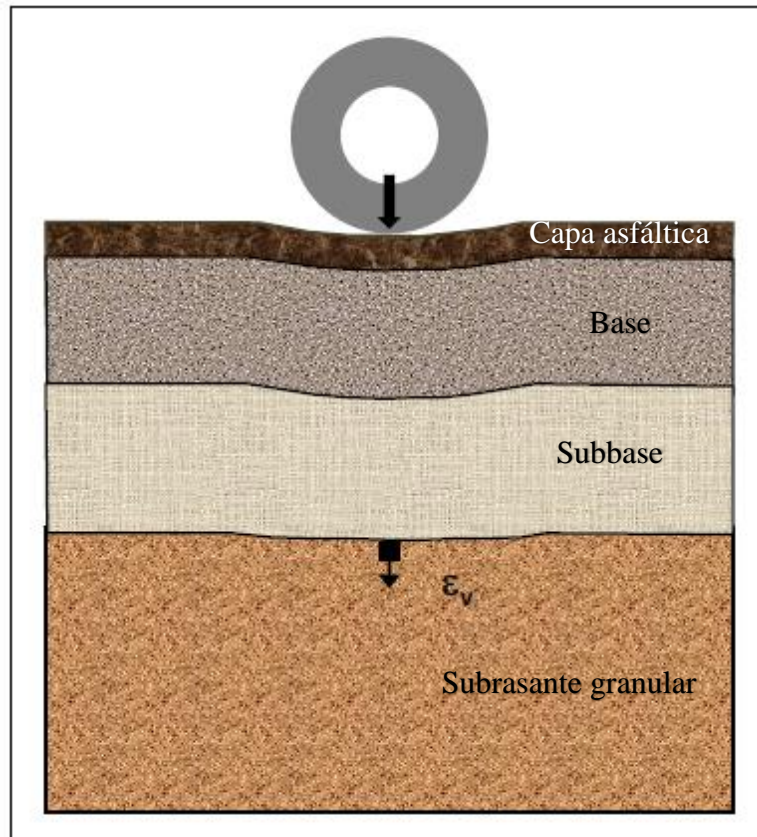


Fuente: (Instituto Mexicano del transporte, 2001)

6.2.1. Deformación permanente en la subrasante.

Las capas inferiores de un pavimento flexible y la subrasante se analizan para detectar la deformación permanente y se calcula utilizando la deformación vertical compresiva en la parte superior del pavimento, como se evidencia en la Figura 12. Las funciones de transferencia están disponibles para 10 y 20 mm de ahuellamiento en la capa.

Figura 12. Parámetro crítico y ubicación para capas seleccionadas y de subrasante



Fuente: (Jenkins, 2013)

Si la subrasante o la capa seleccionada tiene 20 mm de ahuellamiento, entonces es probable que el ahuellamiento en la superficie del pavimento sea considerablemente más alto que el típico 20 mm de profundidad de rodadura terminal. Los módulos resilientes recomendados se muestran en la Tabla 5. Según Jenkins ³², los modelos utilizados para la deformación permanente en la subrasante utilizan la deflexión en la parte superior de la capa subrasante, y son modelos que aún no se han implementado ampliamente.

³² Jenkins, et al. (2013). South African Pavement Engineering Manual: Pavement Design. In *South African Pavement Engineering Manual: Vol. Chapter 10* (Issue January).

Tabla 5. Módulos elásticos (MPa) de la subrasante

Clase	Módulo de elasticidad (MPa)	Límite de relación modular	Rigidez máxima permitida (MPa)	Radio de penetración (mm/golpe)
G7	120	1.7	140	9.1 a 14.0
G8	90	1.6	100	14.0 a 19.0
G9	70	1.4	90	19.0 a 25.0
G10	45	1.2	70	> 25

Fuente: (Jenkins, 2013)

“La relación modular se define como la relación entre la rigidez de una capa en relación con la rigidez de la capa debajo de ella. Por tanto, si la rigidez de una capa base es de 300 MPa, y la rigidez del soporte debajo de ella es de 200 MPa, entonces la relación modular de la capa base es 1.5”³³.

Dado que las capas seleccionadas generalmente se compactan a una altura de 150 a 200 mm, el tamaño de partícula máximo permitido está entre 100 y 130 mm, esto es lo equivalente a dos tercios del espesor de capa. Los materiales para la subrasante utilizado en el diseño del pavimento suelen ser de bajo costo y requieren un transporte mínimo. Los requisitos de material son relativamente bajos y no muy altos, estos materiales suelen estar disponibles con facilidad. “La calidad y rigidez relativas de la subrasante es el punto de partida para el diseño, ya que la subrasante es clave y determinante en el comportamiento y desempeño general del pavimento”³⁴.

³³ Jenkins, et al. (2013). South African Pavement Engineering Manual: Pavement Design. In *South African Pavement Engineering Manual: Vol. Chapter 10* (Issue January).

³⁴ Jenkins, et al. (2013). South African Pavement Engineering Manual: Pavement Design. In *South African Pavement Engineering Manual: Vol. Chapter 10* (Issue January).

6.3. MODELO DE MÓDULOS RESILIENTES EN MATERIAL GRANULAR

Según Little ³⁵, en 1948 reconocieron que el módulo dinámico de elasticidad para subrasante es un parámetro de gran importancia para entender el agrietamiento (por fatiga) de las superficies de asfalto y que la carga monotónica podría no ser la adecuada para su determinación. En 1995, Hveem evaluó el comportamiento resiliente de los pavimentos, propuso la prueba de estabilómetro para caracterizar la subrasante. Seed y sus colegas de la Universidad de California siguieron lo establecido por Hveem y desarrollaron pruebas de carga repetida e introdujeron el término de módulo de resiliencia. Este término fue definido como la magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable, ver Ecuación 1.

Ecuación 1. Módulo Resiliente

$$Mr = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{axial}}$$

Donde:

σ_1 : Esfuerzo principal mayor

σ_3 : Esfuerzo principal menor

σ_d : Esfuerzo desviador

ε_{axial} : Deformación recuperable

Modelos de k- θ . Modelo de Hicks y Uzan

En otro planteamiento, se expresa la influencia del nivel de esfuerzo sobre el módulo resiliente como una función de la suma de los esfuerzos principales. En este sentido, se sugirió la relación hiperbólica también conocida por el modelo k- θ , este modelo se muestra el comportamiento elástico no lineal mediante la Ecuación 2:

³⁵ Little, D. N. (1995). Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. *National Lime Association*, 219.

Ecuación 2. Comportamiento elástico no lineal

$$Mr = k_1 * \theta^{k_2}$$

Donde:

θ = Primer invariante de esfuerzos ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

k_1 y k_2 = Constantes de regresión del material obtenidos a partir de ensayos triaxial de carga repetida realizados en materiales granulares.

Las constantes del material k_1 y k_2 dependen de la densidad y contenido de humedad del material de ensayo. El primer invariante de esfuerzos (θ) es igual a la suma de los esfuerzos principales ($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) que actúan en el modelo, las constantes del material k_1 y k_2 dependen de la densidad y del contenido de humedad del material de ensayo.

En 1990, Sweere ajustó y calibró este modelo para la misma zahorra artificial **ZA25**, obteniendo un coeficiente de determinación igual a 0,93 y unas constantes $k_1 = 931$ y $k_2 = 0,76$. En la Figura 13, se puede observar un mejor ajuste de la predicción de los puntos observados en el ensayo. El modelo k - θ tiene el inconveniente de no considerar el efecto del esfuerzo desviador sobre las propiedades resilientes y, además de asumir un coeficiente de Poisson (n) constante que, permite calcular la deformación radial. Según Pérez ³⁶, en este tipo de ensayos se han encontrado valores de (n) superiores a 0.5. Por otra parte, diversos estudios han demostrado que en los materiales granulares el coeficiente de Poisson no es constante y cambia con el nivel de los esfuerzos aplicados.

Ecuación 3. Coeficiente de Poisson

$$n = \frac{\varepsilon_3 r}{\varepsilon_1 r}$$

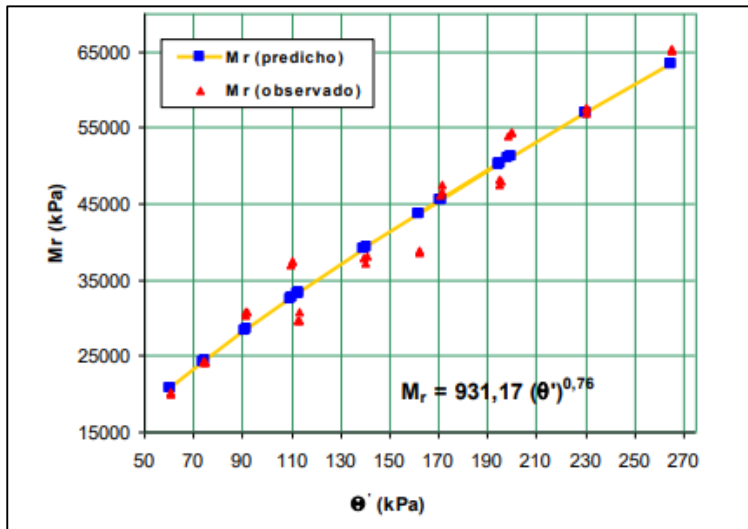
Donde:

ε_1 r: Deformación axial resiliente.

ε_3 r: Deformación horizontal resiliente.

³⁶ Pérez, I. P., & García, M. R. (2003). *Modelos mecánicos de los materiales granulares sueltos empleados en firmes de carreteras*.

Figura 13. Ajuste de modelo $k-\theta$.



Fuente: (Pérez, García, 2003).

El ajuste del modelo de $k-\theta$ representa una distribución de los datos de la invariante de esfuerzos con el módulo resiliente, obteniendo buena correlación en los datos predichos y datos observados y permite tener confianza en los datos encontrados, Según Pérez ³⁷, otro inconveniente del modelo de $k-\theta$ radica en que solamente se tiene en cuenta el efecto del esfuerzo sobre el módulo resiliente mediante la suma de los esfuerzos principales. Diferentes estudios han demostrado que este planteamiento es insuficiente y que se requieren parámetros adicionales del esfuerzo. Según Uzan en 1985, el planteamiento llevado a cabo más tarde; un análisis en tres dimensiones (3D) consiste en sustituir el esfuerzo desviador efectivo por la tensión efectiva tangencial octaédrica.

Ecuación 4. Módulo resiliente

$$MR = k1 * po * \left(\frac{\theta}{po}\right)^{k2} * \left(\frac{\sigma_{oct}}{po}\right)^{k3}$$

³⁷ Pérez, I. P., & García, M. R. (2003). *Modelos mecánicos de los materiales granulares sueltos empleados en firmes de carreteras*.

En este caso, empleó un esfuerzo de referencia de (p_o) de 100 kPa, igual a la presión atmosférica. En el modelo de Uzan se mantiene constante el Coeficiente de Poisson y el esfuerzo desviador inicial de partida sigue siendo igual a cero.

6.4. MODELACIÓN NUMÉRICA

Los pavimentos son estructuras multicapa, tienen como fin reducir los esfuerzos y deformaciones generados tanto por los vehículos como por los cambios climáticos. Los pavimentos generalmente se clasifican como flexible o rígido (asfalto o concreto hidráulico) y este está ubicado en las capas superiores ocupando un alto módulo, en cambio, las capas inferiores están compuestas por material granular, donde entre mayor sea la profundidad menor es su módulo (calidad).

6.4.1. Estudio de subrasante para un pavimento flexible.

“Teniendo en cuenta los volúmenes de tránsito, la variabilidad de las condiciones del pavimento, resultados de los ensayos y algunos conceptos de tipo económico parece recomendable la elección de un valor de diseño, ya que espera un deterioro prematuro de hasta el 25% del pavimento que se construya”³⁸. De acuerdo a la diversidad de los suelos, se categorizan los suelos de subrasante con relación a la variedad de resistencias para el diseño estructural, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Categorías de la subrasante

Categoría	Descripción	Módulo resiliente
S1	Suelos con elevados contenidos de humedad	$300 \leq MR < 500$
S2	Suelos conformados por cenizas volcánicas	$500 \leq MR < 700$
S3	Suelos con altos contenidos de fragmentos de roca	$700 \leq MR < 1000$
S4	Suelos areno-limosos en regiones cálidas húmedas	$1000 \leq MR < 1500$
S5	Suelos gruesos de origen ígneo	$MR \geq 500$

Fuente: (Montejo Fonseca, 2002)

³⁸ Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*.

7. ESTADO DEL ARTE

Según Gómez ³⁹, en 2019 se realizó un estudio con base en ensayos de laboratorio de proctor modificado donde se empleó un método de estabilización con una mezcla binaria de hidróxido de calcio y ceniza de carbón para un suelo de granular fino del occidente de Colombia. El residuo estabilizante está compuesto por cal apagada de grado comercial y residuo de la combustión de carbón proveniente de Medellín, Colombia, con 25% y 75% de masa, respectivamente. Los resultados obtenidos por el autor, demuestran que, al aumentar el porcentaje del agente estabilizador, también aumenta el porcentaje de humedad óptima, siendo esto más notorios para mezclas estabilizantes superiores a un 14% de masa.

Los efectos resultantes demuestran que, al aumentar gradualmente el agente estabilizador en el suelo, las condiciones mecánicas del suelo son favorables, además, para obtener mejoras en condiciones a resistencia a la tracción se pueden emplear dosificaciones de ceniza en porcentajes de masa de 17, 9 y 15%.

El diseño de un pavimento tiene como objetivo prevenir fallas durante su vida útil que está considerada dentro del rango de 20 a 30 años. Lav ⁴⁰, en el 2014, en Estambul, Turquía, se realizaron análisis de laboratorio con porcentajes de ceniza volante y cal determinando la rigidez mediante el módulo resiliente para el diseño del pavimento. La ceniza volante que fue utilizada es de clase F con las especificaciones mencionadas en la Tabla 7 y además, la determinación del tamaño de las partículas para los agregados utilizados.

³⁹ Gómez, D., Carvajal, G., Balaguera, A., & Arias, Y. P. (2019). Technical and environmental assessment for soil stabilization using coal ash. *ISEC 2019 - 10th International Structural Engineering and Construction Conference, Zhang 2015*, 1–6.

⁴⁰ Lav, M. A., & Lav, A. H. (2014). Effects of stabilization on resilient characteristics of fly ash as pavement material. *Construction and Building Materials*, 54, 10–16.

Tabla 7. Características de los materiales utilizados

Ceniza volante clase F	Contenido de calcio (%)	1.61
	Pérdida por ignición (LOI)	1.28
	Tamaño de partícula min a máx. (μm)	0.15 a 174
Cal	Tamaño de partícula min a máx. (μm)	0.2 a 152

Fuente: (M. Aysen Lav, 2014)

Donde:

(μm) = Micra

Un total de 83% del material empleado corresponde a un tamaño menor al de 45 μm , para la prueba realizada se emplearon datos controlados a una temperatura a 23°C y todas las muestras a un 50% de humedad. La mezcla realizada entre la ceniza volante y la cal fueron de 2, 4, 8 y 10%, para el último caso, quiere decir que 10 gramos de cal se mezclaron con 90 gramos de ceniza volante. Para los materiales granulares, se probó una sola frecuencia (periodo de repetición) y una duración de carga (ancho de pulso de 1 Hz, y 100 ms.) “Se basa en la deformación recuperable bajo carga repetida, ya que el ciclo de carga y descarga presenta un bucle de histéresis. Por lo tanto, se define como la relación entre la amplitud del esfuerzo axial repetido y la amplitud del esfuerzo axial recuperable resultante”⁴¹.

A estas dosificaciones se les hicieron pruebas de tracción indirecta para observar la variación del módulo de elasticidad a lo largo del tiempo y la influencia del contenido de agente estabilizador; El contenido de humedad fue óptimo y también utilizando la densidad seca máxima, con una fuerza aplicada de 300 N, todo esto en cumplimiento con la norma establecida que lo rige ASTM D 412382. El ensayo realizado fue en muestras curadas durante 7, 28, 180 y 300 días. Se realizó una prueba cíclica triaxial a las cenizas volantes estabilizadas, utilizando aire comprimido para proporcionar presión de confinamiento.

⁴¹ Lav, M. A., & Lav, A. H. (2014). Effects of stabilization on resilient characteristics of fly ash as pavement material. *Construction and Building Materials*, 54, 10–16.

De acuerdo a los resultados obtenidos por este autor durante la prueba, las muestras fueron sometidas a diferentes presiones de confinamiento en el orden de 250, 200, 150, 100 y 50 kPa, generando niveles de deformación muy por debajo de las líneas de falla.

Ecuación 5. Ecuación empleada para módulo resiliente

$$M_R = k_1 \theta^{k_2}$$

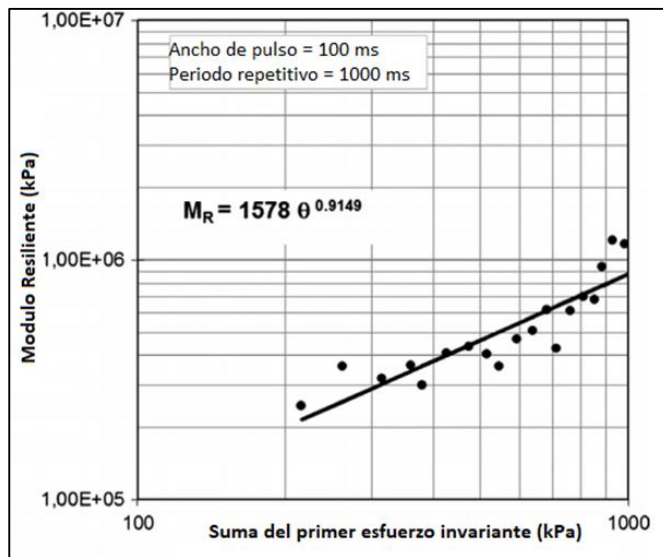
En la Ecuación 5, los valores de k_1 y k_2 , son las constantes que dependen del contenido de cal agregado en la investigación, y (θ), es la suma de la tensión invariante. Se evidenciaron los siguientes resultados, ver Tabla 8:

Tabla 8. Muestra de ceniza volante estabilizada con porcentajes de cal

Porcentaje de Cal (%)	k_1	k_2
2	1578	0.9149
4	13185	0.6526
8	3770	0.7879
10	3695	0.9164

Fuente: (M. Aysen Lav, 2014)

Figura 14. Modelo de módulo resiliente para 2% de ceniza volante y cal



Fuente: (M. Aysen Lav, 2014)

La Figura 14, representa gráficamente el modelo para el módulo resiliente con una dosificación al 2% de ceniza y cal, teniendo un rango entre 100 a 1000 kPa para la suma del primer esfuerzo invariante. Según los resultados obtenidos por el autor, se concluyó que la ceniza volante estabilizada es un material dependiente de la tensión, las muestras que tenían un mayor contenido de cal presentaron deformaciones más bajas. Cabe destacar que los resultados encontrados anteriormente en la revisión literaria, son los esperados para evaluar un aporte estructural empleando un análisis lineal multicapa, más, sin embargo, es importante aplicar dosificaciones de ceniza volante en capas de pavimento convencional, para obtener deformaciones menores.

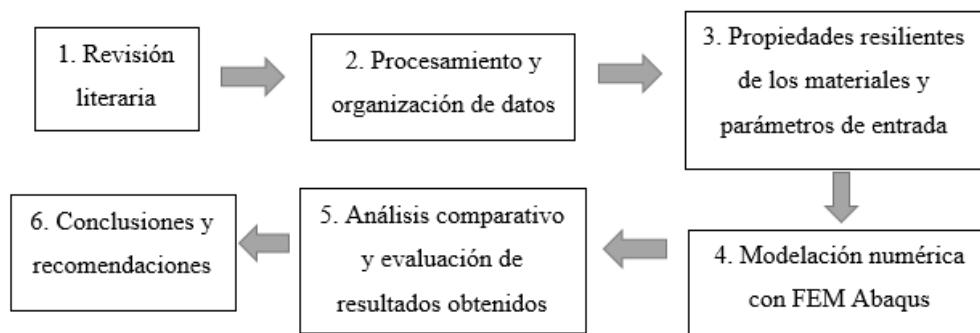
Según Senol ⁴², en Wisconsin, EE.U.U., en el 2005 se realizaron análisis de laboratorio empleando distintos tipos de ceniza volante para cuatro tipos de subrasante blandas para carreteras. Se consiguió evaluar la capacidad de resistencia aumentada en el suelo en mezclas homogéneas de ceniza volante sometiéndolas a pruebas de laboratorio, tales como resistencia a la compresión no confinada y ensayo de (CBR), y así determinar la resistencia y el porcentaje óptimo de dosificación. Las muestras se prepararon con porcentajes entre el 10, 12, 14, 16, 18 y 20%, y se realizaron luego de 7 días de curado en temperatura ambiente. Los resultados obtenidos por el autor, recomiendan que con un 7% más del contenido de agua óptimo y dentro del rango de porcentaje de ceniza estudiado, tiene una tendencia general de aumento de la resistencia a la compresión inconfiada y minimiza el retraso de compactación en el campo. En términos de costo de material, el uso de cenizas volantes menos costosas puede reducir la cantidad requerida de cal, además puede ofrecer ahorros de costos en comparación con la estabilización con cemento portland al reducir el costo del material hasta en un 50%. Suponiendo que el área a estabilizar es lo suficientemente grande, el costo de la estabilización es menos costoso que el socavado y el reemplazo con suelo o material granular adecuado. En un caso, esta reducción ahorró más del 20% del costo del pavimento sin estabilización.

⁴² Senol, A., Edil, T. B., Bin-Shafique, M. S., Acosta, H. A., & Benson, C. H. (2006). Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation and Recycling*, 46(4), 365–376.

8. METODOLOGÍA

Se realizó una investigación literaria de carácter descriptiva y analítica evaluando el aporte estructural en un pavimento flexible convencional aplicando las propiedades resilientes encontradas en la estabilización de la subrasante empleando ceniza volante. Esto permitió realizar una comparación cuantitativa de los resultados obtenidos por el software de modelación numérica Abaqus para conocer el aporte estructural real de la capa subrasante modificada. La metodología utilizada en el presente estudio consistió en la búsqueda de información en la revisión literaria hasta el análisis de los resultados obtenidos por medio de modelación numérica. Las fases se evidencian en la Figura 15.

Figura 15. Fases de la metodología



Fuente: El autor

Fase 1. Revisión Literaria

La investigación inició a partir de una revisión literaria que logró obtener, examinar y clasificar información encontrada en el análisis realizado por Lav ⁴³, sobre las características resilientes de las cenizas volantes como material de pavimento; y así evaluar el aporte estructural de una capa subrasante estabilizada con ceniza volante por modelación numérica Abaqus. Se consultó en bases de datos como Scopus, ScienceDirect, entre otras.

⁴³ Lav, M. A., & Lav, A. H. (2014). Effects of stabilization on resilient characteristics of fly ash as pavement material. *Construction and Building Materials*, 54, 10–16.

Fase 2. Procesamiento y organización de datos

A partir de la información recopilada en la revisión literaria, se efectuó la organización e identificación de datos de entrada que se requieren para realizar pruebas de modelación numérica que permitieron conocer el aporte estructural para un pavimento flexible convencional modificando diferentes porcentajes de ceniza volante empleado como estabilizante en la capa subrasante del suelo. Las cenizas volantes utilizadas para este estudio son clase F, las especificaciones de la ceniza volante se encuentran mencionadas anteriormente en la Tabla 7. Para la modelación numérica del pavimento se consideraron cinco (5) pruebas en la modificación de la subrasante, una primera prueba sin agregación de estabilizante (capa control) y 4 más, con dosificaciones de 2, 4, 8 y 10% de mezcla homogénea de ceniza volante y cal, ver Tabla 9.

Para el último porcentaje de mezcla, quiere decir que 10 gramos de cal se mezclaron con 90 gramos de ceniza volante. El módulo resiliente se calculó empleando la Ecuación 5 y los datos mencionados anteriormente en la Tabla 8. El esfuerzo invariante (θ) a utilizar fue de 0.5 MPa, teniendo en cuenta que los valores en x de la Figura 14 varían entre 0.1 y 1 MPa. Los cinco (5) tipos de prueba de la capa subrasante se modelaron como un material homogéneo, isotrópico y elástico lineal, para la capa subrasante de control se empleó un MR de 40 MPa de acuerdo a las recomendaciones encontradas por Manrique ⁴⁴.

Tabla 9. Obtención de módulo resiliente para la subrasantes control y modificadas

MR (MPa)	Porcentaje de mezcla (%)	θ (MPa)
40	Control	-
464.94	2	0.5
761.08	4	
504.50	8	
1008.45	10	

Fuente: El Autor

⁴⁴ Manrique-Sanchez, L., & Caro, S. (2019). Numerical assessment of the structural contribution of porous friction courses (PFC). *Construction and Building Materials*, 225, 754–764.

Fase 3. Propiedades resilientes de los materiales y parámetros de entrada

Para el presente estudio se seleccionó un pavimento flexible convencional, se consideraron capas completamente adheridas y se compone con la siguiente estructura: i) Una capa denominada carpeta asfáltica con un material isotrópico visco elástico lineal. ii) una capa de base. iii) una capa de subbase iv) y la subrasante; estas últimas tres, son capas continuas con materiales elástico lineal, isotrópicos y homogéneos. Este pavimento flexible convencional corresponde a un AASHTO de bajo tráfico (AASHTO, 1993) .Los espesores de capas y las propiedades elásticas lineales de los materiales se encuentran relacionadas en la Tabla 10.

Tabla 10. Propiedades elásticas de los materiales en el pavimento de control

Capa	E (MPa)	Relación de Poisson	Espesor (cm)
Carpeta Asfáltica	3500	0.35	15
Base	400	0.4	20
Subbase	150	0.4	30
Subrasante	40	0.45	N/A

Fuente: El autor

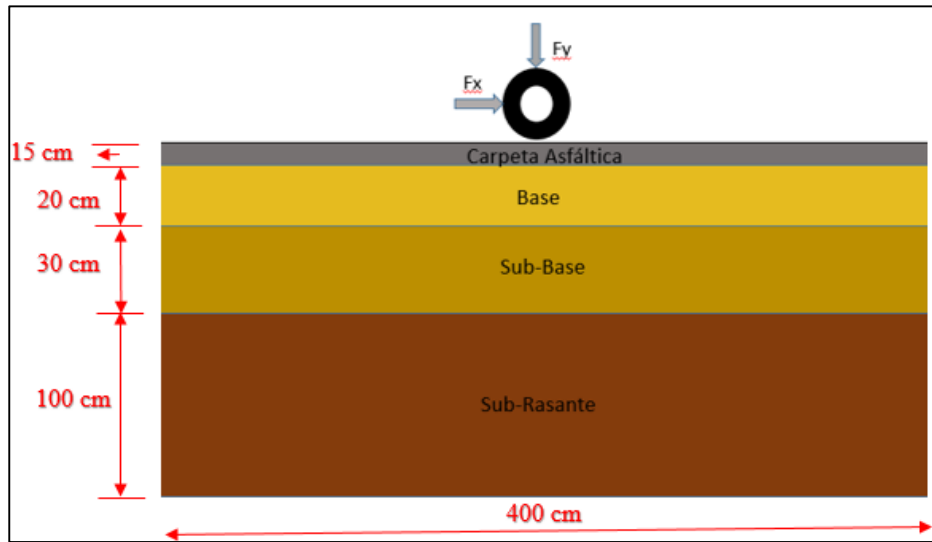
Dónde: N/A: No aplica

Teniendo en cuenta las condiciones de borde, para obtener una representación adecuada de deformación debajo de la rueda de carga, para los cinco (5) tipos de prueba la capa subrasante y la longitud horizontal total de las estructura del pavimento se definieron con base a las recomendaciones proporcionadas por Duncan ⁴⁵ y Olidis ⁴⁶. Este permitió concluir que una subrasante con un espesor de 100 cm y una longitud horizontal del modelo de 400 cm eran suficientes para evitar las condiciones de borde, ver la Figura 16.

⁴⁵ Duncan, J. M., Monismith, C. L., & Wilson, E. L. (1968). Finite Element Analyses of Pavements. *Highway Research Board*, 38, 18–33.

⁴⁶ Olidis, C., & Hein, D. (2004). *Guide for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures materials characterization is your agency ready?*

Figura 16. Geometría del pavimento para la modelación numérica



Fuente: El autor

Se realizaron 5 modelaciones numéricas; para la capa subrasante su módulo varía de acuerdo a las investigaciones encontradas, iniciando con un módulo de 40 MPa para la subrasante control y para las subrasantes estabilizadas con distinta dosificación de (2, 4, 8, y 10%) de ceniza volante y cal, los módulos calculados se encuentran en la Tabla 9. Las demás capas del pavimento (capa asfáltica, base y subbase) se caracterizaron de acuerdo a la Tabla 10.

Las modelaciones anteriores fueron sometidas a una carga de rueda en movimiento que se aplicó al pavimento durante la modelación numérica, con una velocidad de 40 km/h considerada típica para carreteras. La rueda en desplazamiento horizontal sobre el pavimento representa la carga de la mitad de un eje estándar de 8,2 toneladas con una presión de contacto (q) de 0,89 MPa y un radio de contacto (r) de 12,0 cm. La rueda aplicó una fuerza vertical (F_y) de 41.0 kN y una fuerza de fricción (F_x) que representa la fricción de rodadura media de 0,84 kN, de acuerdo a las recomendaciones dadas por Milne⁴⁷. Las fuerzas mencionadas anteriormente, se representan gráficamente en la Figura 16.

⁴⁷ Milne, T. I., Huurman, M., van de Ven, M. F. C., Jenkins, K. J., Scarpas, A., & Kasbergen, C. (2004). Towards Mechanistic Behaviour of Flexible Road Surfacing seals using a Prototype FEM Model. *8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, September*.

Fase 4. Modelación numérica con FEM Abaqus

“El proceso de diseño de un pavimento se debe tener en cuenta características fundamentales como; la carga de diseño en función de la vida útil, el flujo de tráfico y el tipo de vehículo, la capacidad portante de la cimentación y cualquier esfuerzo aplicado, el espesor y las especificaciones de las capas, determinan la capacidad de servicio del pavimento durante su vida útil de diseño”⁴⁸. Teniendo en cuenta los parámetros y las caracterizaciones establecidas anteriormente, se realizó la modelación empleando el software de elementos finitos Abaqus.

Fase 5. Análisis comparativo y evaluación de resultados obtenidos.

Con los resultados obtenidos se realizó un análisis comparativo del aporte estructural de las 5 modelaciones de pavimentos; para la capa subrasante control y las capas subrasantes estabilizadas con las distintas dosificaciones de mezcla homogénea de ceniza volante y cal.

Fase 6. Conclusiones y recomendaciones.

El objetivo principal de esta investigación fue cuantificar las propiedades resilientes de una capa subrasante estabilizada con diferentes dosificaciones de ceniza volante y cal, donde se analizó el aporte estructural de acuerdo a los resultados encontrados con la modelación numérica realizada empleando el software Abaqus en un pavimento flexible convencional. Esta investigación permitió conocer aportes significativos de la ceniza volante en los pavimentos, se debe ampliar la literatura para el uso y aprovechamiento de este material.

⁴⁸ Douglas, R. (2015). Pavement Design. *Low-Volume Road Engineering*, 109–130.

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

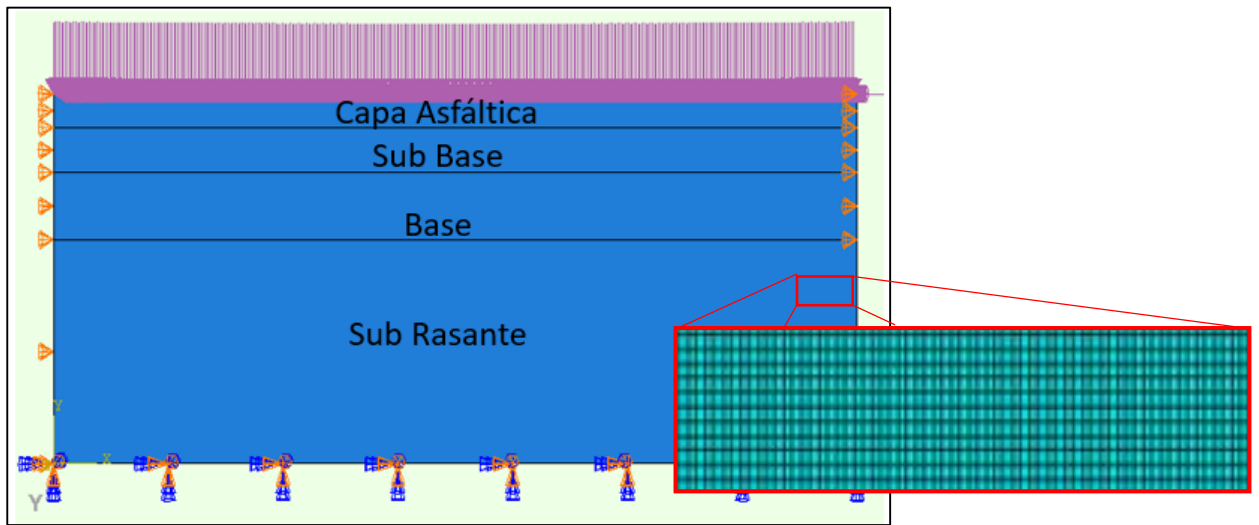
A continuación, se exponen los resultados obtenidos en el proceso de investigación. El resultado más relevante es la deformación vertical en cada una de las dosificaciones modeladas. En la Tabla 9, se pueden ver los módulos resilientes hallados mediante la ecuación de la recta, Ecuación 5, y el valor de esfuerzos invariantes (θ) intermedio es de 0.5 MPa. Se modeló un pavimento flexible convencional de acuerdo a la Tabla 9, variando las propiedades resilientes encontradas en la subrasante para 5 tipos, una sin alterar (subrasante control) y cuatro (4) tipos más de acuerdo a las dosificaciones en investigación, de (2, 4 ,8 y 10%) en la estabilización de la capa subrasante.

Modelación numérica con FEM Abaqus

ABAQUS es un software de diseño que permite la modelación de estructuras mediante elementos finitos, permitiendo modelar diferentes tipos de estructuras y representa gráficamente la distribución de deformaciones. El método de elementos finitos permite encontrar múltiples ventajas para evaluar un modelo conceptual y numérico de acuerdo al análisis del pavimento. Se realiza la modelación de una estructura multicapa de pavimento para examinar las respuestas mecánicas del pavimento con una carga dinámica aplicada.

Para el diseño de modelo se colocó un enmallado vista en la Figura 17 y las condiciones de frontera donde limita al movimiento de la sección en todas las direcciones.

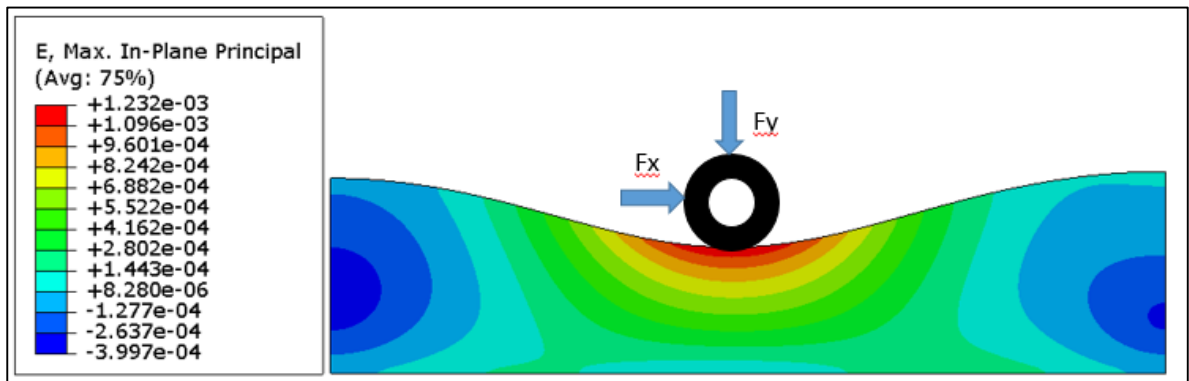
Figura 17. Condiciones de borde y enmallado de las capas



Fuente: El autor

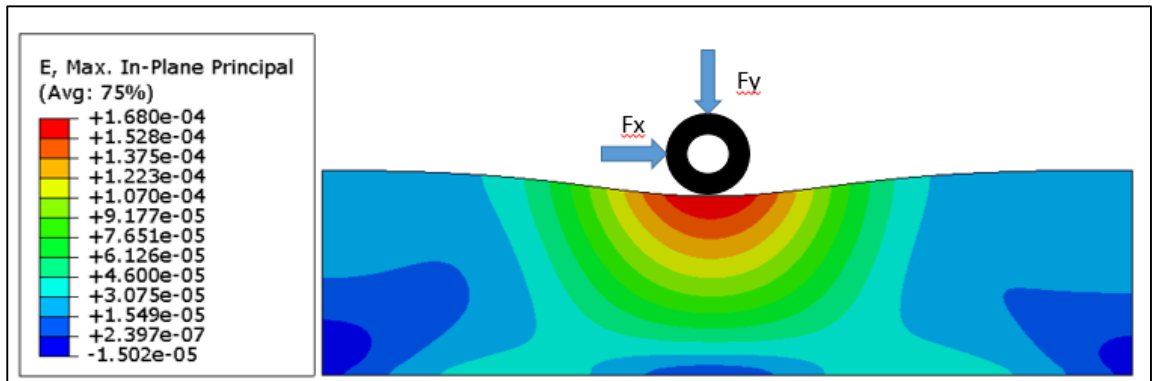
Para efectos prácticos, gráficamente se despreciaron las capas superiores (carpeta asfáltica, base y subbase). La capa subrasante de control, como se muestra en la Figura 18 con una escala de deformación visual del 190%, se puede verificar que gráficamente y cuantitativamente en la leyenda sus deformaciones son mayores a diferencia de la capa subrasante estabilizada al 2%, ver Figura 19, esta última con una escala de deformación visual del 450%, donde se evidencio que la capa subrasante estabilizada al 2% disminuye un 87.51% la deformación vertical con respecto a la capa subrasante de control.

Figura 18. Análisis de carga en la superficie de la subrasante de control



Fuente: El autor.

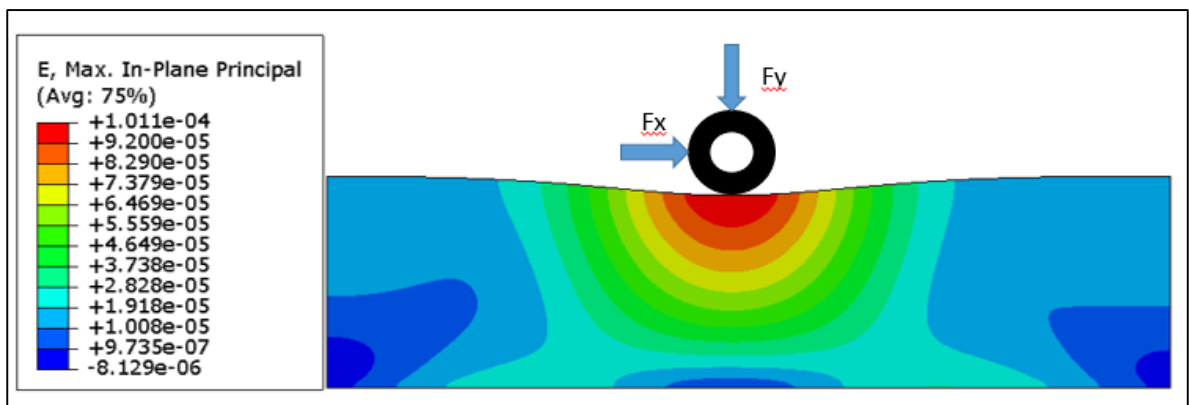
Figura 19. Análisis de carga en la superficie de la subrasante estabilizada al 2%



Fuente: El autor.

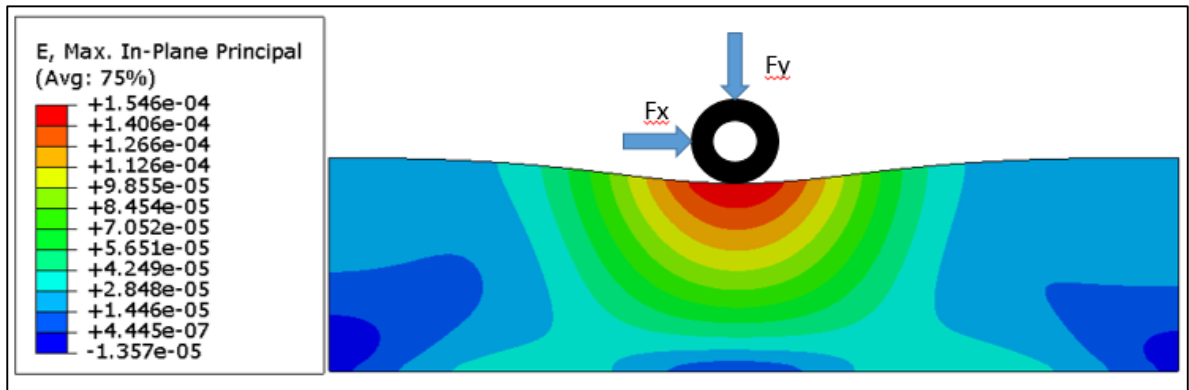
En la Figura 20, se evidencian los resultados de la capa subrasante estabilizada al 4% con una deformación visual al 500% y la Figura 21 perteneciente a los resultados obtenidos de la capa subrasante estabilizada al 8% con deformación visual al 460%, se puede analizar que para las capas subrasantes estabilizadas al 4 y 8% con ceniza volante y cal, disminuyen la deformación vertical un 89.07% y 88.92% respectivamente, con relación a la deformación vertical de la capa subrasante de control, ver Tabla 11.

Figura 20. Análisis de carga en la superficie de la subrasante estabilizada al 4%



Fuente: El autor

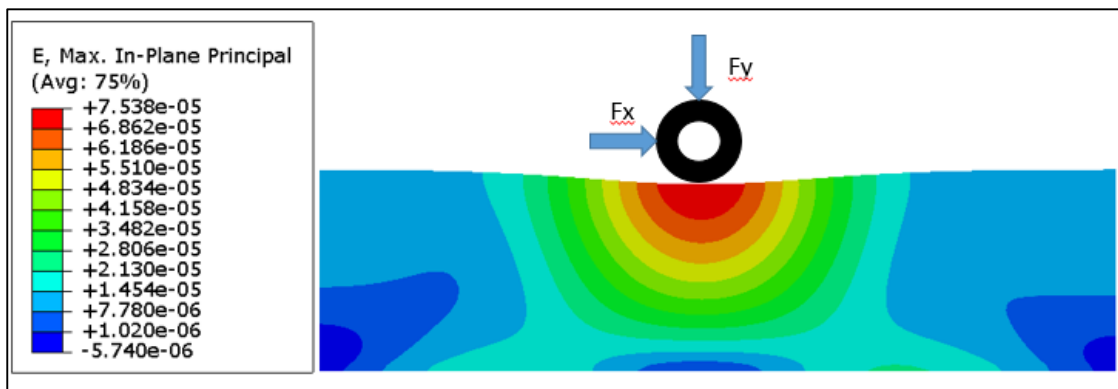
Figura 21. Análisis de carga en la superficie de la subrasante estabilizada al 8%



Fuente: El autor

La capa subrasante estabilizada al 10% de dosificación con una deformación visual al 525%, ver Figura 22, demuestra que la deformación vertical disminuye un 89.92% con relación a la capa subrasante de control.

Figura 22. Análisis de carga en la superficie de la subrasante estabilizada al 10%



Fuente: El autor

Finalmente, en la Tabla 11 se demuestra que la capa subrasante estabilizada al 10% con mezcla homogénea de ceniza volante y cal, es la más eficiente con respecto a las otras dosificaciones evaluadas ya que disminuye un 89.92% la deformación vertical (ϵ_c) con base a la capa subrasante de control y por ende incrementa la capacidad de resistencia y aporte estructural en el pavimento mejorando la calidad del suelo.

La subrasante estabilizada al 8% se evidenció que su deformación vertical es mayor a la dosificación de 4 y 10%, convirtiéndolo en un dato atípico, ya que no continua con el orden natural al decrecimiento de la deformación, donde se maneja la hipótesis que esto ocurre a falencias en el laboratorio o que presenta mayor dispersión en la ecuación de la recta del modelo matemático.

Tabla 11. Deformación vertical (ϵ_c) hallada por Abaqus

Dosificación (%)	ϵ_c	Disminución ϵ_c vs capa control
Control	2.410E-03	-
2	3.010E-04	87.51 %
4	2.634E-04	89.07 %
8	2.670E-04	88.92 %
10	2.430E-04	89.92 %

Fuente: El autor

Dados los resultados obtenidos de las deformaciones verticales se procedió a realizar el cálculo de números de ejes equivalentes para todas las modelaciones en estudio, aplicando la fórmula de la Universidad de Nottingham visualizada en Tabla 12.

Tabla 12. Ecuación de números de ejes equivalentes

Organización	Ecuación de modelo
Instituto del asfalto	$Nd = 1.365 \times 10^{-9} (\epsilon_c)^{-4.477}$
Shell Petroleum	$Nd = 6.15 \times 10^{-7} (\epsilon_c)^{-4}$
Universidad de Nottingham	$Nd = 1.13 \times 10^{-6} (\epsilon_c)^{-3.571}$
Mn/ROAD	$Nd = 7.0 \times 10^{15} (\epsilon_c)^{-3.909}$

Fuente: (Leiva, F, Pérez E, Aguiar J & Loría L, 2017)

Donde:

ϵ_c : Deformación vertical

Nd : Numero de ejes equivalentes

Como resultado, las capas subrasantes estabilizadas ceniza volante y cal, incrementan el número de ejes equivalentes con relación a la capa subrasante de control, ver Tabla 13. Teniendo en cuenta lo anterior, la capa subrasante estabilizada al 10% aumenta un 114.76% respecto a la capa subrasante al 2%, en otras palabras, incrementa el nivel de servicio del pavimento de acuerdo a lo establecido por el nivel de tránsito ⁴⁹. “La variable más importante en el diseño de una vía es el tránsito, por ende el número y peso de los ejes de estos son factores determinantes de la estructura del pavimento”⁵⁰.

Tabla 13. Número de ejes equivalentes y nivel de tránsito

Dosificación (%)	ξ_c	Nd	incremento Nd vs subrasante al 2%	Nivel de tránsito
Control	2.410E-03	2.523	-	1 - bajo
2	3.010E-04	4.247.344	-	2 - medio
4	2.634E-04	6.840.054	61.04 %	3 - alto
8	2.670E-04	6.516.385	53.42 %	3 - alto
10	2.430E-04	9.121.756	114.76 %	3 - alto

Fuente: El autor

Análisis comparativo de las metodologías de dosificación

Lav ⁵¹, utilizaron ceniza volante clase F, donde realizaron laboratorios con porcentaje de ceniza volante y cal determinando la rigidez mediante el módulo resiliente para el diseño estructural de un pavimento. La mezcla utilizada de ceniza y cal fueron de 2, 4, 8 y 10%, hicieron pruebas de tracción indirecta para observar la variación del módulo de elasticidad y la influencia del agente estabilizador. Se complementó la investigación con modelos de elementos finitos y se registró decrecimiento en la deformación vertical a mayor porcentaje de ceniza y cal como lo muestra la Tabla 11, teniendo una reducción del 89.92% con una

⁴⁹ INVIAS. (2012). *Norma y especificaciones INVIAS (2012)*.

⁵⁰ Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*.

⁵¹ Lav, M. A., & Lav, A. H. (2014). Effects of stabilization on resilient characteristics of fly ash as pavement material. *Construction and Building Materials*, 54, 10–16.

dosificación máxima del 10% y una reducción del 87.51% con una dosificación mínima del 2% de ceniza y cal en las deformaciones, teniendo como base la dosificación de control. La estabilización al 8% registra un aumento en las deformaciones contrariando los resultados obtenidos por el software de elementos finitos, convirtiéndolo en un dato atípico de factor externo a los modelos en Abaqus.

Senol ⁵², estudió varias muestras de suelos estabilizado utilizando 10, 12, 14, 16, 18 y 20% de ceniza volantes clase F, donde realizaron estudios de laboratorios para CBR y resistencia a la compresión no confinada y poder determinar el efecto de la compactación. Obtuvieron para el suelo “Scenic Edge, WI” a los 7 días de curación índices de CBR de 3 para el suelo sin estabilizar, 34 para el 12%, 51 para 16% y 56 para la dosificación máxima de 20%, teniendo incrementos de índices de CBR del 64.70% asumiendo como base la mínima dosificación para el suelo. Para el mismo suelo obtuvieron resultados de compresión inconfiada (kPa) de 140 para el suelo sin estabilizar, 772 para el 12%, 828 para el 16 y 863 para la dosificación máxima del 20%, teniendo incrementos de compresión inconfiada (kPa) del 11.79% asumiendo como base el 12% de dosificación del suelo.

Posteriormente se puede definir que en ambas investigaciones, la ceniza volante con cal como agente estabilizador representa incrementos en la resistencia del suelo independientemente su metodología, siendo un subproducto generado por la combustión de carbón, entre otros, que finalmente terminan siendo residuos que de una manera u otra afectan la contaminación en el planeta por lo tanto sus costos no son elevados, permitiendo ser adquiridos fácilmente y mejorando las condiciones ambientales y así continuar con el desarrollo de nuevos métodos de reciclaje para la ceniza volante y carbón en busca de la mejora estructural del suelo. Cabe aclarar que las metodologías o ensayos de laboratorios realizados por los diferentes autores son propias de sus investigaciones, ya que, no hay una norma que establezca una metodología específica que se deba implementar.

⁵² Senol, A., Edil, T. B., Bin-Shafique, M. S., Acosta, H. A., & Benson, C. H. (2006). Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation and Recycling*, 46(4), 365–376.

10. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de las propiedades resilientes para una capa subrasante estabilizada con ceniza volante clase F, siendo necesario agregar cal para activar las propiedades puzolánicas en la mezcla. Después de analizar la estructura lineal multicapa de pavimento flexible convencional por medio de software Abaqus, se demostró que, al agregar porcentajes determinados de ceniza volante y cal para la estabilización de una capa subrasante, se disminuyen las deformaciones verticales de la capa incrementado el aporte estructural y la resistencia del suelo. La capa subrasante estabilizada al 10% de mezcla homogénea de ceniza volante y cal, disminuye un 89.92% la deformación vertical con relación a la capa subrasante sin estabilizar.

Las cenizas de clase F exhiben menor rigidez que las cenizas de tipo C, debido a su bajo contenido de cal, pero a su vez la ceniza volante sola no genera mejoras en el aporte estructural, por tal motivo se recomienda usar aditivos como la cal. Por tal motivo a mayor porcentaje de ceniza y cal presenta mayor rigidez y/o mayor módulo resiliente. Por medio de los porcentajes de cenizas volantes determinados en esta investigación, se calculó el número de ejes equivalentes utilizando el modelo propuesto por la Universidad de Nottingham obteniendo tráfico medios y altos según la AASHTO de 1993; donde a su vez teniendo como referencia el número de ejes equivalentes de la capa subrasante estabilizada al 2% y comparando con la capa estabilizada al 4% de dosificación, se pudo verificar un incremento del 61% de ejes equivalentes estándar, y finalmente proyectando a la capa subrasante estabilizada 10%, se observa un incremento de más del 114% de ejes equivalentes estándar, disminuyendo considerablemente las deformaciones verticales y el ahuellamiento. Esto permite concluir que la ceniza volante es un material estabilizante apto para el mejoramiento de la capa subrasante de un pavimento flexible convencional.

11. RECOMENDACIONES

Se recomienda emplear dosificaciones de mezclas homogéneas e isotrópicas de ceniza volante clase F y cal en porcentajes de 2, 4, y 10% para la estabilización de capas subrasantes en un pavimento flexible convencional, se demostró que la estabilización al 8% presenta menor resistencia en la deformación vertical respecto a los otros porcentajes analizados.

Se sugiere verificar el comportamiento de la carpeta asfáltica para evitar fatiga, siendo esta una investigación limitada al estudio de la capa subrasante. Las cenizas volantes clase F deben estar acompañadas de un agente actuante como la cal o el cemento portland.

Mejorar las propiedades resilientes de una capa subrasante agregando agentes estabilizadores como la ceniza volante y la cal, permite aumentar la capacidad estructural del pavimento y esta aplicación a su vez, minimiza los costos en la selección de alternativas estructurales para el diseño de un pavimento, evitando que este suelo sea sustituido por otro que cumpla en mejor forma los requisitos deseados.

La implementación de software para modelación con elementos finitos presenta un sin número de posibilidades para analizar el comportamiento de una estructura lineal multicapa de una manera más dinámica y eficaz.

12. ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACIÓN

Este proyecto se dará a conocer mediante la socialización del mismo con los docentes encargados de la línea de pavimentos de la Universidad Católica de Colombia, y de igual manera, se adjuntará una copia digital en el banco de proyectos de la Universidad Católica de Colombia para que pueda ser consultado por estudiantes y/o personas interesadas en la línea temática de investigación.

13. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993 - American Association of State Highway and Transportation Officials*. AASTHO. <https://books.google.com.ec/books?id=1HRB12tBQNMC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- ACAA. (2020). *Asociación Americana de Cenizas de Carbón*. <https://www.aaa-usa.org/>
- Andavan, S., & Pagadala, V. K. (2020). *A study on soil stabilization by addition of fly ash and lime*. 22, 1125–1129. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.323>
- Bautista-Ruiz, W. A. (2017). Characterization of flying ashes of a thermoelectric plant for its possible use as an additive in the manufacture of cement Mercedes Díaz-Lagos 2 Segundo Agustín Martínez-Ovalle 3. *Rev. Investig. Desarro. Innov*, 8(1), 135–146. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n1.2017.7374>
- Bhatt, A., Priyadarshini, S., Acharath Mohanakrishnan, A., Abri, A., Sattler, M., & Techapaphawit, S. (2019). Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00263. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00263>
- Douglas, R. (2015). Pavement Design. *Low-Volume Road Engineering*, 109–130. <https://doi.org/10.1201/b19036-10>
- Duncan, J. M., Monismith, C. L., & Wilson, E. L. (1968). Finite Element Analyses of Pavements. *Highway Research Board*, 38, 18–33.
- Garnica, P., & Gómez, J. A. (2001). *Deformaciones permanentes en materiales granulares para la sección estructural de carreteras. Publicación Técnica No. 176*, 1–46. <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt176.pdf>
- Gómez, D., Carvajal, G., Balaguera, A., & Arias, Y. P. (2019). Technical and environmental assessment for soil stabilization using coal ash. *ISEC 2019 - 10th International Structural Engineering and Construction Conference, Zhang 2015*, 1–6.

<https://doi.org/10.14455/isec.res.2019.171>

INVIAS. (2012). *Norma y especificaciones INVIAS (2012)*.

Jenkins, et al. (2013). South African Pavement Engineering Manual: Pavement Design. In *South African Pavement Engineering Manual: Vol. Chapter 10* (Issue January).

Lav, M. A., & Lav, A. H. (2014). Effects of stabilization on resilient characteristics of fly ash as pavement material. *Construction and Building Materials*, 54, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.029>

Little, D. N. (1995). Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. *National Lime Association*, 219.

M.W. Heyns ;Dr M. Mostafa Hassan. (2012). *Innovative soil stabilization of classified G5 Sub-base material stabilized with Fly Ash: An South African experience*.

Mackiewicz, S.M., & Ferguson, E. W. (2005). *Stabilization of Soil with Self-Cementing Coal Ashes*.

Manrique-Sanchez, L., & Caro, S. (2019). Numerical assessment of the structural contribution of porous friction courses (PFC). *Construction and Building Materials*, 225, 754–764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.200>

Melissari, B. (2012). *Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa*.

Milne, T. I., Huurman, M., van de Ven, M. F. C., Jenkins, K. J., Scarpas, A., & Kasbergen, C. (2004). Towards Mechanistic Behaviour of Flexible Road Surfacing seals using a Prototype FEM Model. *8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, September*.

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. -. <https://www.libreriaingeniero.com/2018/02/ingenieria-de-pavimentos-alfonso-montejo.html>

NLA. (2020). *The National Lime Association – NLA – NLA’s mission is to represent, protect, and promote the nation’s lime industry*. <https://www.lime.org/>

- Okunade, E. A. (2010). Geotechnical Properties of Some Coal Fly Ash Stabilized Southwestern Nigeria Lateritic Soils. *Modern Applied Science*, 4(12), p66. <https://doi.org/10.5539/mas.v4n12p66>
- Olidis, C., & Hein, D. (2004). *Guide for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures materials characterization is your agency ready?*
- Ozdemir, M. A. (2016). Improvement in Bearing Capacity of a Soft Soil by Addition of Fly Ash. *Procedia Engineering*, 143, 498–505. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.063>
- Pérez, I. P., & García, M. R. (2003). *Modelos mecánicos de los materiales granulares sueltos empleados en firmes de carreteras*.
- Rahhal, V., Pedrajas, C., Irassar, E., & Talero Morales, R. (2014). Efecto de puzolanas naturales sobre la reología de pastas de cemento portland. *Concreto y Cemento: Investigación y Desarrollo*, 5(2), 2–11.
- Senol, A., Edil, T. B., Bin-Shafique, M. S., Acosta, H. A., & Benson, C. H. (2006). Soft subgrades' stabilization by using various fly ashes. *Resources, Conservation and Recycling*, 46(4), 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.08.005>
- Silva Urrego, Y. F., & Delvasto Arjona, S. (2018, March 5). *Concreto autocompactante con materiales cementicios suplementarios de Colombia*. <https://doi.org/10.4995/hac2018.2018.6090>
- Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 141, pp. 105–121). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>